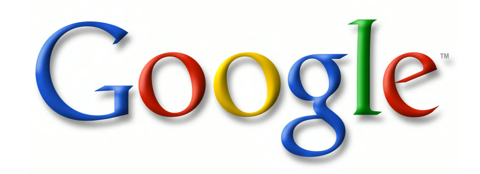
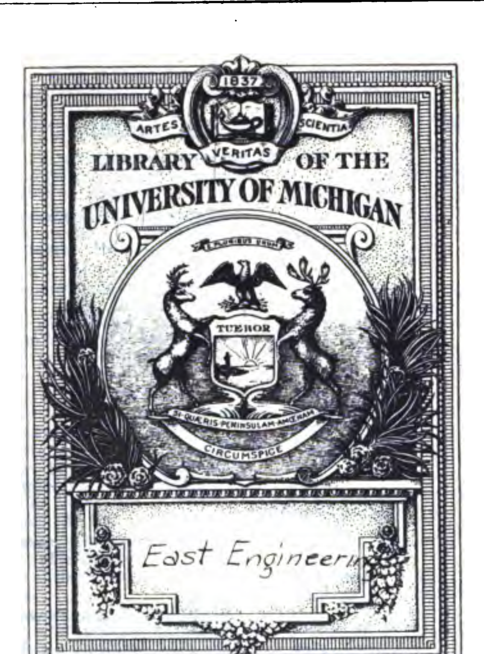
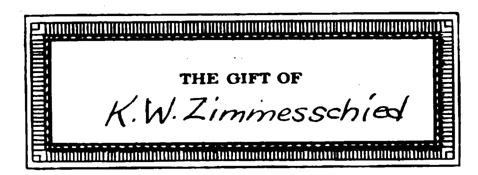



EAST ENGIN.
LIBRARY
TA
410
.M53
A 786,636
Sammlung Göschen
Materialprüfungswesen
I
Materialeigenschaften, Festigkeitsversuche, Hilfsmittel für Festigkeitsversuche
von
K. Memmler
Mit 58 Figuren


1837
ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
East Engineering


THE GIFT OF
K.W. Zimmesschied

Sammlung Göschen

Je in elegantem Leinwandband **80 Pf.**

G. J. Göschen'sche Verlagshandlung, Leipzig.

Ausgleichungsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate von Wilh. Weitbrecht, Prof. der Geodäsie in Stuttgart. Mit 15 Figuren und 2 Tafeln. Nr 302.

Baukunst, Die, des Abendlandes von Dr. K. Schäfer, Assistent am Gewerbemuseum in Bremen. Mit 22 Abbild. Nr. 74.

Betriebskraft, Die zweckmäßigste, von Friedrich Barth, Oberingenieur in Nürnberg. 1. Teil: Die mit Dampf betriebenen Motoren nebst 22 Tabellen über ihre Anschaffungs- und Betriebskosten. Mit 14 Abbildungen. Nr. 224.

— — 2. Teil: Verschiedene Motoren nebst 22 Tabellen über ihre Anschaffungs- und Betriebskosten. Mit 29 Abbildungen. Nr. 225.

Bewegungsspiele von Dr. E. Kohlrausch, Professor am Kgl. Kaiser Wilhelms-Gymnasium zu Hannover. Mit 14 Abbild. Nr. 96.

Biologie der Pflanzen von Dr. W. Migula, Prof. an der Forstakademie Eisenach. Mit 50 Abbild. Nr. 127.

Biologie der Tiere I: Entstehung u. Weiterbild. d. Tierwelt, Beziehungen zur organischen Natur v. Dr. Heinr. Simroth, Professor a. d. Universität Leipzig. Mit 33 Abbildungen. Nr. 131.

— — II: Beziehungen der Tiere zur organ. Natur v. Dr. Heinr. Simroth, Prof. an der Universität Leipzig. Mit 35 Abbild. Nr. 132.

Bleicherei. Textil-Industrie III: Wäscherei, Bleicherei, Färberei und ihre Hilfsstoffe von Wilhelm Massot, Lehrer an der Preuß. höh. Fachschule f. Textilindustrie in Krefeld. Mit 28 Fig. Nr. 186.

Brauereiwesen I: Mälzerei von Dr. Paul Dreverhoff, Direktor der Öffentlichen und I. Sächs. Versuchsstation für Brauerei und Mälzerei sowie der Brauer- u. Mälzerschule zu Grimma. Mit 16 Abbildungen. Nr. 303.

Buchführung. Lehrgang der einfachen u. dopp. Buchhaltung von Rob. Stern, Oberlehrer der Öff. Handelslehranst. u. Doz. d. Handelshochschule z. Leipzig. Mit vielen Formularen. Nr. 115.

Buddha von Professor Dr. Edmund Hardy. Nr. 174.

Burgenkunde, Abriß der, von Hofrat Dr. Otto Piper in München. Mit 30 Abbild. Nr. 119.

Chemie, Allgemeine und physikalische, von Dr. Max Rudolphi, Doz. a. d. Techn. Hochschule in Darmstadt. Mit 22 Figuren. Nr. 71.

— **Analytische,** von Dr. Johannes Hoppe. I: Theorie und Gang der Analyse. Nr. 247.

— — II: Reaktion der Metalloide und Metalle. Nr. 248.

— **Anorganische,** von Dr. Jos. Klein in Mannheim. Nr. 37.

— — siehe auch: Metalle. — Metalloide.

Chemie, Geschichte der, von Dr. Hugo Bauer, Assistent am chem. Laboratorium der Kgl. Technischen Hochschule Stuttgart. I: Von den ältesten Zeiten bis zur Verbrennungstheorie von Lavoisier. Nr. 264.

— — II: Von Lavoisier bis heute. Nr. 265.

— **der Kohlenstoffverbindungen** von Dr. Hugo Bauer, Assistent am chem. Laboratorium der Kgl. Techn. Hochschule Stuttgart. I. II: Aliphatische Verbindungen. 2 Teile. Nr. 191. 192.

— — III: Karbocyklische Verbindungen. Nr. 193.

— — IV: Heterocyklische Verbindungen. Nr. 194.

— **Organische,** von Dr. Jos. Klein in Mannheim. Nr. 38.

— **Physiologische,** von Dr. med. A. Legahn in Berlin. I: Assimilation. Mit 2 Tafeln. Nr. 240.

— — II: Dissimilation. Mit 2 Tafeln. Nr. 241.

Chemisch-Technische Analyse von Dr. G. Lunge, Professor an der Eidgenöss. Polytechn. Schule in Zürich. Mit 16 Abbild. Nr. 196.

Fortsetzung auf der 4. Vorsatzseite.

Sammlung Göschen

Materialprüfungswesen

Einführung in die moderne Technik der Materialprüfungen

von

K. Memmler
Diplomingenieur
Ständiger Mitarbeiter am Königlichen Material-Prüfungsamte
zu Groß-Lichterfelde

Erster Teil

Materialeigenschaften. — Festigkeitsversuche. —
Hilfsmittel für Festigkeitsversuche

Mit 58 Figuren

Leipzig
G. J. Göschen'sche Verlagshandlung
1907

Spamersche Buchdruckerei in Leipzig-R.

Inhaltsverzeichnis.

Erster Teil.

Einleitung.

Das Materialprüfungswesen bildet einen wichtigen Teil der Technologie und beschäftigt sich mit der physikalischen und chemischen Prüfung der Bau- und Konstruktionsmaterialien sowie einer Reihe von Gebrauchsmaterialien des öffentlichen Wirtschaftslebens, wobei vor allem diejenigen Eigenschaften festgestellt werden, die für den Erzeuger oder Verbraucher des Materials in Rücksicht auf seinen jeweiligen Verwendungszweck Interesse haben.

Die Materialprüfung baut ihre Forschungsergebnisse in erster Linie auf praktischen Versuchen auf, die unter Berücksichtigung der Grundlehren der Mechanik, Physik und Chemie ausgeführt werden.

Betrachten wir die geschichtliche Entwicklung der Materialprüfung, so ist zu bemerken, daß das Bestreben, Materialien vor ihrer Verarbeitung zu Gebrauchsgegenständen auf ihre Brauchbarkeit zu prüfen, zweifellos bis in die Zeiten der ersten Kulturanfänge zurückreicht. Die auf wissenschaftlicher Grundlage aufgebaute Materialprüfung jedoch, die den Bedürfnissen der modernen Technik Rechnung zu tragen hat und deren Forschungsergebnisse ein unentbehrliches Rüstzeug des Ingenieurs bilden, ist noch eine verhältnismäßig junge Wissenschaft; sie hat aber mit schnellem Wachstum im Laufe weniger Jahrzehnte eine so gewaltige Entwicklung erfahren, daß sie heute, ebenbürtig ihren Schwesterwissenschaften, zu den wichtigsten Disziplinen der Technik gehört.

Die ersten Veröffentlichungen über planmäßig ausgeführte Materialprüfungen, die weiteren Kreisen bekannt geworden sind, stammen aus dem Anfang der sechziger Jahre des vorigen Jahrhunderts; sie behandeln die Prüfung von Eisenstäben mit Hilfe des Zugversuches und rühren von dem englischen Ingenieur Kirkaldy her. In Deutschland verhalfen anfangs der siebziger Jahre die Versuche Wöhlers in der Kgl. Reparaturwerkstatt zu Frankfurt a. O. zu der Erkenntnis, daß die im lebhaften Aufblühen begriffene Maschinentechnik einer auf besonderer Fach- und Sachkenntnis beruhenden Materialprüfung nicht entraten könne. Wöhler unterwarf bei seinen sogenannten „Dauerversuchen“ Stäbe aus Eisen, Stahl, Messing, Kupfer usw. einer viele Millionen Male wiederholten Belastung auf Zug, Druck, Biegung und Verdrehung, wobei er besondere maschinelle Hilfsmittel benutzte. Er ermittelte so diejenige Belastung, die die betreffenden Materialien bei ihrer Verwendung im Betriebe zu tragen vermögen, ohne daß Bruch zu befürchten ist, und veröffentlichte seine Ergebnisse im Jahre 1870 in der Zeitschrift für Bauwesen. In neuerer Zeit gewinnt die von Wöhler in Anwendung gebrachte Versuchsart (Dauerversuch, s. S. 99) wieder mehr und mehr an Bedeutung, nachdem man in mehreren Jahrzehnten die Erfahrung gemacht, daß der bisher fast ausschließlich zur Beurteilung der Konstruktionsmaterialien im Gebrauch gewesene Zerreißversuch, bei dem durch einmalige Belastung der Stab zum Zerreißen gebracht wird, den Beweis für die Brauchbarkeit eines Materials nicht immer erschöpfend zu erbringen vermag. Die Wöhlerschen Versuche fanden ihre Fortsetzung durch Spangenberg, der an der Berliner Gewerbeakademie wirkte und aus dessen nur bescheiden ausgestattetem Versuchslaboratorium sich im Laufe der Jahre das mit allen modernen

Hilfsmitteln prächtig ausgerüstete Materialprüfungsamt*) der Charlottenburger Hochschule entwickelt hat.

Erhebliche Zunahme an Bedeutung erfuhr die wissenschaftliche Materialprüfung in Deutschland durch die vielseitigen Arbeiten Bauschingers, der im Laboratorium der Techn. Hochschule zu München auf fast allen einschlägigen Gebieten grundlegende Studien betrieben hat und dem besonders auch die Anregungen zur Vereinheitlichung der Prüfungsverfahren zu danken sind, einer Aufgabe, der sich in neuerer Zeit der zu diesem Zweck gegründete „Internationale Verband" unterzogen hat.

In den letzten zwanzig Jahren hat die Literatur des Materialprüfungswesens außerordentliche Bereicherung erfahren. Neben den vielseitigen Veröffentlichungen von Tetmajer, v. Bach sind besonders zu nennen die Arbeiten von Martens, der in der wissenschaftlichen Vertiefung der Prüfungsverfahren, insbesondere aber auch in der konstruktiven Durchbildung der Prüfungsmaschinen und -Apparate seine Lebensaufgabe erblickt hat und eine reiche Ausbeute wissenschaftlicher Forschung in seiner „Materialienkunde für den Maschinenbau"**) niedergelegt hat. In dem genannten Werke ist das Gebiet des Materialprüfungswesens, wenigstens soweit es die Materialien des Maschinenbaues angeht, zum ersten Male erschöpfend behandelt worden. Für die Beschreibung der Materialeigenschaften, der Festigkeitsversuche und der Hilfsmittel für Festigkeitsversuche, die den Inhalt des vorliegenden ersten Bändchens bildet, ist daher auch die Anordnung des Stoffes in Martens' Materialienkunde

---

*) Vergleiche hierzu: „Denkschrift zur Eröffnung des Kgl. Materialprüfungsamtes", verfaßt von A. Martens und M. Guth. Berlin 1904. J. Springer.

**) Verlag von J. Springer, Berlin 1898.

vorbildlich gewesen, zumal dieses Werk auch für die im Königlichen Materialprüfungsamte zu Groß-Lichterfelde in ständiger Anwendung befindlichen Arbeitsweisen grundlegend ist. Martens gebührt ferner das Verdienst, zuerst in Deutschland der Metallographie, dem Studium des Kleingefüges der Materialien, die Wege geebnet zu haben. Allgemeine Anerkennung haben ferner die Arbeiten auf speziellen Gebieten von Kick, Barba, Föppl, Rudeloff, Gary, Herzberg, Holde, Heyn, Styffe, Thurston, Unwin, Sandberg, Dudley und vielen anderen erlangt. — Dem modernen Materialprüfungswesen sind in neuester Zeit zahlreiche Pflegstätten an den technischen Hochschulen erstanden. Die dort ausgebildeten Versuchsverfahren haben in technischen Kreisen weite Verbreitung gefunden; erstrebenswert bleibt jedoch noch viel weiter gehende Vereinheitlichung der Verfahren, die trotz der rührigen Tätigkeit der Verbände noch immer nicht den wünschenswerten Umfang angenommen hat; wir begegnen deswegen auch, besonders in der Technik der Maschinen- und Baukonstruktionen, einer Unmenge einzelner Prüfungsvorschriften, die teils von Behörden, teils von privaten Interessentengruppen aufgestellt sind, nur in Nebensachen Unterschiede aufweisen, häufig versuchstechnische Schwierigkeiten in sich schließen und dadurch bei ihrer Durchführung Anlaß zu Weiterungen geben.

I. Material-Eigenschaften.

Die Eigenschaften, die die Materialprüfung zu studieren hat, können physikalischer und chemischer Natur sein.

1. Physikalische Eigenschaften.

Von den physikalischen Eigenschaften haben für den Materialprüfungstechniker, der Metalle und Baustoffe prüft, hauptsächlich Bedeutung: Festigkeit, Formänderungsvermögen, Härte, Zähigkeit und Sprödigkeit, Bearbeitbarkeit oder Bildsamkeit, während die sonstigen physikalischen Eigenschaften mehr bei der Prüfung der Verbrauchsmaterialien (Papier, Schmieröle, Bindemittel usw.) als bei den Festigkeitsversuchen Gegenstand des Studiums sind.

a) Festigkeit.

Mit Festigkeit bezeichnet man ganz allgemein den Widerstand, den ein Material der Trennung seiner einzelnen Teile entgegensetzt. Die Kohäsionskraft bewirkt Zusammenhalten der Materialteile, die zu ihrer Überwindung erforderliche Kraft bewirkt Trennung der Materialteile voneinander und ist das Maß für die Festigkeit des Materials. — Der Kraftaufwand zur Überwindung der Materialfestigkeit wird für gewöhnlich gemessen nach Kilogrammen oder Tonnen (1000 kg), bezogen auf die Einheit derQuerschnittsfläche des Körpers, also auf das qmm oder qcm. In der maschinen- und hüttentechnischen Praxis werden die Festigkeiten meist auf das qmm bezogen angegeben; man spricht dort kurzweg z. B. von einem Eisen mit 40 kg Festigkeit und bezeichnet damit eine Eisensorte,

die dem Zerreißen mit jedem qmm ihres Querschnittes einen Widerstand von 40 kg entgegensetzt; ein Rundstab von 20 mm Durchmesser = 314 qmm Querschnitt dieses Materials würde also bei 40 × 314 = 12560 kg Belastung zerreißen. In der bautechnischen Praxis und in der Literatur ist die Angabe der Festigkeit bezogen auf das qcm gebräuchlicher. Zuweilen begegnet man auch Angaben der Festigkeit in Atmosphären, wobei die technische Atmosphäre gleich 1 kg/qcm zugrunde gelegt ist. —

Ist eine einwandfreie Messung des Querschnittes erschwert oder nicht möglich, weil der Versuchskörper Hohlräume enthält oder aus Material hergestellt ist, dessen Dichtigkeitsgrad (Verhältnis des Raumgewichts zum spezifischen Gewicht, s. S. 22) kleiner als 1 ist, z. B. Hanf- und Drahtseile, Lederriemen, Papier, so wird die Festigkeit eines solchen Materials als Reißlänge angegeben.

Mit Reißlänge, einem Begriffe, der von Reuleaux vorgeschlagen ist, bezeichnet man den Quotienten $\mathfrak{R} = \frac{P}{g}$, wenn P die Bruchbelastung in kg, g das Gewicht des Meters bedeuten. $\mathfrak{R}$ gibt also die Länge in m oder km an, die der Versuchskörper haben müßte, um, an einem Ende frei aufgehängt, unter seinem Eigengewicht zum Bruch zu kommen. Man hat das Gewicht und die Länge des Versuchskörpers zu ermitteln, hieraus das Metergewicht zu errechnen und mit diesem Metergewicht in die beim Versuch ermittelte Bruchbelastung zu dividieren, um die Reißlänge des Materials zu erhalten.

Die Reißlänge rechnet mit Längenabmessungen des Materials, wie sie für die praktische Ausführung zumeist nicht in Frage kommen. Findet man beispielsweise für ein Hanfseil a mit einem Metergewicht von 0,17 kg beim Zerreißversuch eine Bruchbelastung von 1000 kg, so er-

gibt sich eine Reißlänge von 6000 m, ein Maß, das für die Seilfabrikation nicht in Betracht kommt, immerhin aber klar zum Ausdruck bringt, daß ein Seil *b* von den gleichen Abmessungen mit 9000 m Reißlänge eine um 50 Prozent höhere Zerreißfestigkeit hat, daß also in letzterem Seile entweder ein erheblich besseres Material verarbeitet oder das Material bei weitem besser ausgenutzt wurde. —

Je nachdem die den Zusammenhang der Körperteile störenden Kräfte den Körper zu zerreißen, zerdrücken, zu knicken, biegen, scheren oder zu verdrehen streben, spricht man von Zugfestigkeit, Druck-, Knick-, Biege-, Scher-, Verdrehungsfestigkeit. Begriffsentwicklung und Eigentümlichkeiten der einzelnen Festigkeitsarten werden später erörtert werden. —

In bezug auf Art und Dauer der Krafteinwirkung unterscheidet man zweckmäßig mit Tetmajer (Angewandte Elastizitäts- und Festigkeitslehre. Leipzig-Wien 1904. Deuticke):

a) Statische Festigkeit, wenn die Belastung ruhig anwachsend gesteigert wird (Zerreißversuch, Biegeversuch usw.);
b) Stoßfestigkeit, wenn plötzliche, stoßweise Krafteinwirkung stattfindet (Schlagversuch);
c) Schwingungsfestigkeit, wenn die Trennung der Teile durch stoßfreie, wiederholte Anstrengung von großer Häufigkeit bewirkt wird (Dauerversuch). —

Für die einzelnen Materialarten schwanken die verschiedenen Festigkeiten oft in weiten Grenzen, wenngleich es im allgemeinen möglich ist, für bestimmte Materialgruppen obere und untere Grenzwerte ihrer Festigkeiten anzugeben. Die Festigkeit eines Materials ist jedoch mannigfachen Beeinflussungen unterworfen. Bei vielen Materialien, besonders den Metallen, übt die Wärme, die

die Versuchskörper während des Versuches angenommen, großen Einfluß auf die Festigkeit aus. Durch mehrere Arbeiten verschiedener Autoren ist festgestellt, daß z. B. ein Flußeisen, das, bei Zimmerwärme geprüft, etwa 48 kg/qmm Zugfestigkeit ergab, bei 600° C geprüft, nur mehr 10 kg/qmm Zugfestigkeit hatte, während das gleiche Eisen bei 200°C 54 kg/qmm Festigkeit zeigte (s. II. S. 19). Großen Einfluß vermag ferner die Vorbehandlung durch Erwärmung, die besonders Metalle bei ihrer Herstellung erfahren, auf die Festigkeitseigenschaften auszuüben, wenngleich sich weniger die statische als die Stoßfestigkeit verändert zeigt. Heyn (Krankheitserscheinungen im Eisen und Kupfer, Zeitschrift d. Ver. d. Ingen. 1902, S. 1115) teilt z. B. mit, daß von einem Flußeisenblech, infolge stattgehabter Überhitzung (s. II. S. 22), an einzelnen Stellen Teile mit einem Handhammer abgeschlagen werden konnten, während andere Teile des gleichen Bleches bei der statischen Zerreißprobe ganz regelrechte Festigkeitszahlen ergaben.

Einzelne Metalle, besonders Zink und Zinn, zeigen nach Bauschinger und Fischer die Eigentümlichkeit, daß ihre Bruchfestigkeit nahezu die doppelte Größe annehmen kann, wenn die Geschwindigkeit, mit der man beim Zerreißversuch die Belastung steigert, erhöht wird. Bei den gewöhnlichen Konstruktionsmaterialien (Flußeisen, Stahl, Gußeisen, Kupfer usw.) ist der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit jedoch so gering, daß er praktisch nicht in Erscheinung tritt.

Bei der Baumaterialienprüfung sind besonders die Festigkeiten der Bindemittel, wie Zement, Kalk usw., sowie diejenigen des Betons ganz erheblich von dem Alter der Versuchskörper, ferner von der Art ihrer Aufbewahrung (an der Luft, in Wasser, unter Sand usw.) abhängig (s. II. S. 43). Wasseranziehende Körper, wie

Papier, Faserstoffe, ändern ihre Festigkeit je nach ihrem Feuchtigkeitsgehalte (s. II. S. 106). Auch eine oft wiederholte Beanspruchung durch Belastungen von großer Häufigkeit zwischen bestimmten Belastungsgrenzen vermag, wie die Wöhlerschen Dauerversuche ergeben, die ursprüngliche Widerstandsfähigkeit eines Materials herabzumindern.

b) Formänderungsvermögen.

Allen unseren Materialien wohnt die Eigenschaft inne, unter einer Belastung ihre Form entweder vorübergehend oder bleibend zu verändern. Die Größe dieses Formänderungsvermögens ist bei den einzelnen Materialien außerordentlich verschieden; ihre Messung ist eins der wichtigsten Hilfsmittel zur Beurteilung der Materialien. Einen vollkommen starren Körper, der keinerlei Formänderung zu erleiden vermag, kennen wir nicht. Auch die geringste Belastung bringt beim widerstandsfähigsten Körper eine Formänderung hervor, die meßbar wird, wenn nur genügend empfindliche Meßapparate Verwendung finden.

Die Formänderung äußert sich auf verschiedene Weise; man spricht von Dehnung, Zusammendrückung, Durchbiegung, Verdrehung, je nachdem der Körper ziehenden, zusammendrückenden, biegenden oder verdrehenden Kraftäußerungen beim Versuch unterworfen wurde.

In allen Fällen kann die Formänderung entweder eine vorübergehende (elastische) oder eine bleibende sein.

Elastische Formänderung finden wir, wenn das Material die Eigenschaft (Elastizität) besitzt, die unter äußerer Krafteinwirkung angenommene Formänderung nach dem Aufhören der Krafteinwirkung wieder aufzuheben, so daß keine bleibende Gestaltsänderung wahrnehmbar ist. Die einzelnen Materialien zeigen diese Eigenschaft in ganz verschiedenem Maße. Einzelne sind von

vornherein bis zu bestimmten Belastungen elastisch (Gummi, Stahl, Flußeisen), andere erweisen sich zunächst nicht als vollkommen elastisch, können jedoch durch mehrmalige Be- und Entlastung in den vollkommen elastischen Zustand übergeführt werden (Leder, Gußeisen, Beton s. II. S. 36). Wiederum andere Körper erweisen sich von vornherein als unelastisch und können auch nicht in den elastischen Zustand übergeführt werden (Blei, plastische Körper wie Ton usw.) —

Bei allen Materialien besteht elastisches Verhalten jedoch nur bis zu bestimmten Belastungsgrenzen; oberhalb dieser für die einzelnen Stoffe sehr verschieden hohen Belastungsgrenze, die man Elastizitätsgrenze nennt, treten neben den elastischen Formänderungen auch bleibende auf. Die Bestimmung der Elastizitätsgrenze ist im Materialprüfungswesen nicht gebräuchlich, da sie versuchstechnische Schwierigkeiten bietet. Abgesehen davon, daß die Messung elastischer, meist sehr kleiner Formänderungen immer besonders feine Meßinstrumente erfordert, würde die zur Bestimmung der Elastizitätsgrenze nötige Entlastung nach jeder Belastungsstufe den Versuch sehr zeitraubend und umständlich gestalten; für Fälle, wo die Bestimmung der Elastizitätsgrenze jedoch erwünscht ist, nimmt das Königl. Materialprüfungsamt zu Groß-Lichterfelde als Elastizitätsgrenze diejenige Belastung der Querschnittseinheit an, bei der sich nach Entlastung eine bleibende Längenänderung von mindestens 0,03 % der Meßlänge (d. h. der Länge, innerhalb der die Feinmessungen ausgeführt werden, S. 33) ergibt. Es werden hierbei in der Regel Feinmeßapparate benutzt, die die Schätzung der Längenänderungen bis auf 0,00001 cm gestatten, an *einer* Meßlänge von 15 cm (s. S. 143). —

Man ist indessen fast allgemein dazu übergegangen

in allen Fällen, wo es sich um Feststellung der elastischen Materialeigenschaften handelt, statt der Elastizitätsgrenze die sogenannte Proportionalitätsgrenze zu ermitteln. Man bezeichnet damit diejenige Belastungsstufe, bis zu der proportionale Beziehung zwischen Belastungssteigerung und Formänderungszunahme besteht, bis zu der also für gleiche Steigerung der Belastung gleiche Zunahme der Formänderung zu beobachten ist.

Diesem Proportionalitätsgesetz, vielfach auch Hookes Gesetz genannt, folgen nach der landläufigen Anschauung die meisten derjenigen Materialien, die eine ausgesprochene Elastizität zeigen und bei denen die Bestimmung der elastischen Eigenschaften überhaupt für den Verbraucher praktische Bedeutung hat. Einzelne Forscher bestreiten allerdings überhaupt das Vorhandensein dieser Proportionalität und begründen die beobachteten proportionalen Beziehungen mit der Unzulänglichkeit unserer Meßapparate. Indessen hat diese Frage nur rein wissenschaftliche Bedeutung, für die Bedürfnisse der praktischen Materialprüfung bildet die Bestimmung der Proportionalitätsgrenze zweifellos ein außerordentlich wichtiges Hilfsmittel, um besonders dem Konstrukteur rechnerische Grundlagen zu geben, damit er weiß, wie weit er sein Material in dem in Frage kommenden Bauwerk beanspruchen darf, ohne bleibende Gestaltsänderung befürchten zu müssen.

Die Proportionalitätsgrenze fällt erfahrungsgemäß nahezu mit der Elastizitätsgrenze zusammen. Ihre Bestimmung ist jedoch versuchstechnisch wesentlich einfacher als diejenige der Elastizitätsgrenze. Man hat hierbei nur nötig, die Belastung des Versuchskörpers in gleichen Stufen so lange zu steigern, bis die beobachteten Formänderungszunahmen keine gleichbleibenden Werte mehr ergeben, wobei man die Genauigkeit der Bestimmung

beliebig steigern kann, wenn man die Belastungsstufen entsprechend klein wählt. Die Messung der Formänderungen erfordert natürlich sehr empfindliche Meßapparate, auf die später noch näher eingegangen ist (S. 143). —

Oberhalb der Elastizitäts- bzw. Proportionalitätsgrenze hat weitere Belastungssteigerung bleibende Formänderungen zur Folge. Die Formänderungen gehen also nach Aufheben der Belastung nicht mehr ganz, sondern nur teilweise wieder zurück; auch gibt die Formänderungszunahme für gleiche Belastungszunahme nicht mehr gleichbleibende sondern nach und nach anwachsende Werte. Der Übergang zu den bleibenden Formänderungen vollzieht sich bei einzelnen Materialien ganz allmählich, andere hingegen erfahren bald nach Überschreitung der Elastizitätsgrenze plötzlich ganz erhebliche Formänderungen, die entgegen den bisherigen elastischen mit rohen Meßapparaten (Maßstäben mit Millimeterteilung) feststellbar sind. Die Belastungsgrenze, bei der diese großen bleibenden Formänderungen erfolgen, wird im Materialprüfungswesen mit Fließgrenze bezeichnet. Die Bezeichnung „fließen" rührt von Tresca her, der damit recht treffend die Verschiebung der einzelnen Materialmolekel gegeneinander kennzeichnen wollte.

Die Bestimmung der Fließgrenze ist im Materialprüfungswesen für Metalle allgemein gebräuchlich, da man mit ihr als der eigentlichen Formänderungsgrenze zu rechnen und besonders auch aus ihrer Lage im Verhältnis zur Bruchgrenze wichtige Schlüsse auf die Vorbehandlung, die das Material erfahren hat, zu ziehen pflegt (Kaltbearbeitung s. II. S. 17). Ihre Bestimmung bietet bei denjenigen Materialien, die eine scharf ausgeprägte Fließgrenze haben, keine Schwierigkeit, weil, wie später beschrieben, eine ganze Reihe von Merkmalen die Über-

schreitung der Formänderungsgrenze andeuten, ohne daß man besonders empfindliche Meßapparate nötig hätte. — Die meisten formänderungsfähigen Materialien, wie die Metalle, pflegen zudem nach Überschreiten der Fließgrenze ihr Oberflächenaussehen wesentlich zu verändern; blanke Versuchsstäbe zeigen matte, krispelige Oberfläche, Eigentümlichkeiten, auf die später noch näher eingegangen wird.

Wesentlich schwieriger gestaltet sich die Bestimmung der Fließgrenze in solchen Fällen, wo sie nicht scharf ausgeprägt vorhanden ist oder wo der Übergang zu den bleibenden Formänderungen ein ganz allmählicher ist. Vielfach ist bei solchen Materialien überhaupt keine Formänderungsgrenze als solche feststellbar, die Formänderungen wachsen andauernd mit steigender Belastung, bis schließlich Bruch des Materials herbeigeführt wird. Um auch für solche Materialien einen Wert für die Formänderungsgrenze angeben zu können, hat das Königl. Materialprüfungsamt mehrfach vorgeschlagen, für die Bemessung der Streckgrenze diejenige Belastung der Querschnittseinheit zu benutzen, die mindestens eine bleibende Formänderung von 0,2 % der Meßlänge (d. h. der Länge, die für die Dehnungsmessung benutzt wird) ergibt.

In der Praxis begegnet man häufig einer falschen Bezeichnung dieser Fließgrenze, indem sie Elastizitätsgrenze genannt wird. Die Elastizitätsgrenze liegt, wie aus dem Vorhergehenden hervorgeht, meistens sehr viel tiefer als die Fließgrenze und wird, wie schon bemerkt, wohl nur hier und da aus wissenschaftlichem Interesse ermittelt. Je nach der betreffenden Versuchsart, mit der die Fließgrenze ermittelt wurde, spricht man von Streckgrenze beim Zugversuch, Quetschgrenze beim Druckversuch, von Biegegrenze beim Biegeversuch usw.

v. Bach unterscheidet auch neuerdings in einer Arbeit

über die Streckgrenze (Zeitschrift d. Ver. d. Ingenieure 1904, S. 1040) bei Materialien, die diese Formänderungsgrenze ausgeprägt zeigen, zwischen einer oberen und unteren Streckgrenze. Mit oberer Streckgrenze bezeichnet er die Belastung, bei der das Fließen beginnt, mit unterer Streckgrenze diejenige, bis zu der beim eintretenden Fließen die Belastung sinkt. Die Differenz zwischen oberer und unterer Grenze fällt sehr verschieden aus. Bach fand für Flußeisensorten

Obere Grenze	3684 kg/qcm	1896 kg/qcm
Untere „	2601 „	1861 „
Differenz	1083 kg/qcm	35 kg/qcm

Über die Beeinflussungen, die die Formänderungsgrenzen insbesondere bei den Metallen erfahren können, s. II. S. 16. —

Die Formänderungen werden entweder während des Belastungsversuches selbst oder nach seiner Beendigung gemessen. Die gebräuchlichen Bezeichnungen für die verschiedenen Meßgrößen sowie die mathematischen Beziehungen zwischen ihnen sind später bei den einzelnen Versuchsarten angegeben; ebenda sind auch die mannigfachen Beeinflussungen, die die Meßergebnisse erfahren, behandelt. —

Beim Formänderungsvermögen ist noch auf eine Eigentümlichkeit aufmerksam zu machen, die für die praktische Materialprüfung Bedeutung hat, und die man mit Nachwirkungserscheinungen zu bezeichnen pflegt. Man versteht darunter die Eigenschaft einzelner Materialien, unter einer Belastung, wenn diese schnell, aber stoßfrei erfolgt ist, nicht sofort diejenige Formänderung anzunehmen, die dem Formänderungsvermögen des Materials und der betreffenden Belastungsstufe eigen-

tümlich ist, vielmehr ihre Form unter der gleichen Belastung noch lange nachher zu ändern. Bei den gewöhnlich der Prüfung unterworfenen Konstruktionsmaterialien tritt diese Eigentümlichkeit weniger in Erscheinung, jedoch hat Martens („Mitteilungen" 1887; I. Erg. Heft u. „Materialienkunde" S. 29) eingehende Versuche mit Magnesium ausgeführt, bei dem die Nachwirkungsvorgänge ganz besonders charakteristisch erkennbar sind.

c) Härte.

So allgemein gebräuchlich es ist, diese Eigenschaft zur Materialbeurteilung heranzuziehen, so wenig ist es bisher gelungen, eine das Wesen dieser Eigenschaft wirklich erschöpfende Begriffserklärung zu geben. Im Zusammenhang hiermit steht der Umstand, daß auch ein wirklich nach jeder Richtung hin einwandfreies Meßverfahren für die Härte bisher noch nicht angegeben worden ist. Physikalisch pflegt man unter Härte denjenigen Widerstand zu verstehen, den ein Körper dem Eindringen eines anderen entgegensetzt. Andere Erklärungen haben nur teilweise Anklang gefunden. Dr. Herz (Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes 1882, S. 449) erklärt Härte als die Festigkeit, welche ein Körper einer Formänderung entgegensetzt, die der Berührung mit kreisrunder Druckfläche entspricht. Kick (Dinglers polytechn. Journal 1891, S. 292) behauptet: Härte ist proportional der Scherfestigkeit, kann also durch Scherfestigkeit gemessen werden, Härte ist mithin Scherfestigkeit.

d) Zähigkeit und Sprödigkeit.

Unter Zähigkeit versteht man den Widerstand, den ein Körper dem Verschieben seiner Gefügeteile gegen-

einander entgegensetzt; indessen ist auch diese Begriffserklärung nicht als besonders treffend zu bezeichnen, da im Grunde genommen mit der gleichen Erklärung der Begriff „Kohäsionskraft“ erläutert werden könnte, ohne daß es gebräuchlich wäre, beide Begriffe als gleichartig zu betrachten.

Zähigkeit besitzen solche Materialien, bei denen Fließ- und Bruchgrenze weit auseinander liegen und bei denen zwischen beiden Grenzen noch erhebliche Formänderungen stattfinden. Sprödigkeit hingegen ist da zu finden, wo Fließ- und Bruchgrenze nahe beieinander liegen und nennenswerte Formänderungen bis zur Bruchgrenze nicht feststellbar sind. Aus diesen Erläuterungen könnte geschlossen werden, daß Zähigkeit und Sprödigkeit Gegensätze sind; indessen ist Sprödigkeit nur als geringer Grad von Zähigkeit zu bezeichnen.

Spröde nennt man ferner solche Körper, die nur geringe stoßweise Beanspruchung zu ertragen vermögen (Glas); zähe hingegen solche, die auch bei stoßweiser Beanspruchung nur unter Annahme starker Formänderung zerstört werden können.

Die Begriffserklärung ist also, wie ersichtlich, auch bei diesen Materialeigenschaften sehr mannigfach, und ebenso vielseitig sind die Vorschläge zur Messung dieser Eigenschaften. Da alle diese Vorschläge indessen allgemeinere praktische Bedeutung noch nicht gewonnen haben, erübrigt sich die weitere Erörterung an dieser Stelle.

e) Bearbeitbarkeit (Bildsamkeit).

Bildsamkeit oder Bearbeitbarkeit der Materialien nennt man die Eigenschaft, unter mechanischer Bearbeitung in verschiedenen Zuständen bleibende Formänderungen, wie

der Metallprüfung werden die chemischen Eigenschaften bei der Papier-, Öl- und teilweise auch bei der Baumaterialprüfung (s. Bd. II) zur Materialbeurteilung herangezogen.

II. Die Festigkeitsversuche.

Nach der auf Seite 12 gegebenen Einteilung der verschiedenen Arten der Festigkeit hat man zu unterscheiden:

A. Festigkeitsversuche mit stoßfrei gesteigerter Belastung (statische Festigkeit).

B. Schlagversuche mit stoßweiser Belastung.

C. Dauerversuche (Schwingungsfestigkeit).

Ferner sind zu den Festigkeitsversuchen zu zählen:

D. Technologische Proben.

E. Härteprüfungen.

Für die Begriffsentwicklungen in den folgenden Abschnitten sind durchgängig die Bezeichnungsweisen gewählt, wie sie im Königlichen Materialprüfungsamte zu Lichterfelde im Gebrauch sind.

A. Festigkeitsversuche mit stoßfrei gesteigerter Belastung.

Hier sind zu nennen, je nach der Beanspruchung, die der Probekörper erfährt: Zugversuch, Druckversuch, Knickversuch, Biegeversuch, Torsionsversuch, Scher- und Lochversuche.

Die hier genannten Festigkeitsversuche, vor allem der Zugversuch, haben bisher fast ausschließlich zur Materialbeurteilung, besonders der Baustoffe des Maschinenbaues, gedient. Erst neuerdings ist ihre Bedeutung durch die später erörterten Dauerversuche beeinträchtigt worden.

1. Der Zugversuch.

a) Begriffsfeststellungen.

Spannt man einen stabförmigen Probekörper mit seinen beiden Enden fest in die Einspannvorrichtungen einer Prüfungsmaschine ein und überträgt auf das eine Ende des Stabes eine in der Pfeilrichtung (s. Fig. 1) wirkende, durch Krafterzeuger der Prüfungsmaschine hervorgerufene Kraft P, so wird der Stab diese Kraft aufnehmen und mit seinem anderen Ende entweder auf das Maschinengestell oder auf die Meßvorrichtung der Maschine (Wagen, Meßdosen usw., s. S. 129) übertragen. Der Stab wird also in diesem Falle durch entgegengesetzt gerichtete Kräfte P belastet und so einer Zugbeanspruchung unterworfen. Die Kraft P verteilt sich gleichmäßig auf die Querschnittsfläche des Stabes, so daß jede Flächeneinheit eine Zugwirkung erfährt, deren Größe σ durch die Gleichung gegeben ist:

$$\sigma = \frac{P}{f} \text{ in } \frac{\text{kg}}{\text{qcm}} \text{ oder in atm } \left(\frac{1\text{ kg}}{\text{qcm}} = \text{techn. Atmosphäre}\right),$$

worin f die Querschnittsfläche des Stabes in qcm angibt. Die Kraft P stellt die Gesamtbelastung, die der Stab zu tragen hat, in kg dar, die auf die Querschnittseinheit entfallende Kraft σ bezeichnet man mit Spannung. Die Spannungen an den beim Zugversuch zu ermittelnden Belastungsgrenzen kennzeichnet man durch entsprechende Indices; so bedeutet

- σ_P die Spannung an der Proportionalitätsgrenze,
- σ_S die Spannung an der Fließgrenze, beim Zugversuch auch Streckgrenze genannt,
- σ_B die Spannung an der Bruchgrenze (höchste getragene Belastung),
- σ_Z die Spannung an der Zerreißgrenze (die im Augenblick des Zerreißens noch getragene Last).

In allen Fällen ist der Errechnung von σ die ursprünglich vor dem Versuch festgestellte Querschnittsfläche f zugrunde gelegt, was, genau genommen, nicht richtig ist, da der Querschnitt des Stabes und damit die Größe f, wie wir sehen werden, mit steigender Belastung andauernd eine Veränderung erfahren. Indessen gibt man allgemein, besonders weil die Messung des Querschnittes während des Versuches Schwierigkeiten bereitet, σ bezogen auf den ursprünglichen Stabquerschnitt an. — Unter der Kraft P erfährt der Stab eine Gestaltsänderung, die je nach der Größe von P und dem Formänderungsvermögen des Materials ausfällt und eine elastische oder bleibende sein kann (s. S. 14). Die Formänderung äußert sich beim Zugversuch in einer Längenänderung und einer Querschnittsverminderung. Längenänderung und Querschnittsverminderung pflegen bei den Körpern vom Dichtigkeitsgrade 1 (s. S. 11) in bestimmter abhängiger Beziehung zueinander zu bleiben, so daß das Produkt $f \cdot l$ (Rauminhalt) durch die Belastung nicht geändert wird. Die ursprüngliche Länge l geht in die Länge l_1 über, der ursprüngliche Querschnitt f wird zu f_1 (s. Fig. 1).

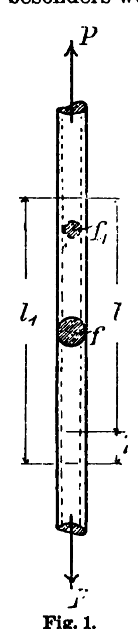


Fig. 1. Zugbeanspruchung.

Es ist also die Längenänderung $\lambda = l_1 - l$. Man gibt auch die Längenänderungen bezogen auf die Längeneinheit an und bezeichnet diese Dehnung mit ε:

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{l} = \frac{l_1 - l}{l}.$$

Analog den Spannungen σ kennzeichnet man auch ε nach den einzelnen Belastungsgrenzen mit entsprechenden Indices: es bedeutet also ε_P die Dehnung der Längeneinheit an der Proportionalitätsgrenze, ε_S die Dehnung der Längeneinheit an der Fließgrenze, ε_B die Dehnung der Längeneinheit an der Bruchgrenze, ε_Z die Dehnung der Längeneinheit an der Zerreißgrenze. —

In der Praxis bestimmt man meistens nur die sogenannte **Bruchdehnung** und bezeichnet sie kurzweg als Dehnung. Es ist dies die Längenänderung einer auf dem Versuchsstabe durch Körner- oder Strichmarken vor dem Versuche abgegrenzten Länge, der sogenannten **Meßlänge**, in Prozenten dieser Meßlänge und nach dem Bruch gemessen. Diese Dehnung δ ist also:

$$\delta = 100\,\varepsilon = 100\left(\frac{l_1 - l}{l}\right)$$

$$= 100\left(\frac{l_1}{l} - 1\right).$$

Bruchdehnung δ braucht nicht unbedingt gleich der hundertfachen Zerreißdehnung der Längeneinheit ($100\,\varepsilon_Z$) zu sein, was man annehmen könnte. ε_Z, während des Versuchs gemessen, pflegt vielmehr gewöhnlich etwas größer als δ zu sein, das nach dem Zerreißen des Stabes gemessen wird, weil in ε_Z ein Teil der Formänderung noch elastisch ist. —

Die Dehnung ε für die Spannungseinheit σ nennt man **Dehnungszahl** α:

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\sigma};$$

es ist also

$$\varepsilon = \alpha\,\sigma,$$

und da $$\varepsilon = \frac{\lambda}{l},$$

so ist $$\lambda = \alpha \sigma l.$$

Den reziproken Wert von α bezeichnet man mit Elastizitätsmodul E:

$$E = \frac{1}{\alpha} = \frac{\sigma}{\varepsilon}.$$

Neuere Vorschläge, besonders von Bach, gehen dahin, den Begriff Elastizitätsmodul aus der Festigkeitslehre ganz verschwinden zu lassen und an seiner Stelle nur mit der Dehnungszahl α zu rechnen. Diese Bestrebungen sollten mit allem Nachdruck unterstützt werden, da α ein viel leichter verständlicher und weniger schwerfälliger Begriff als E ist.

E gibt an: die Belastung der Querschnittseinheit für die Längenänderung der Längeneinheit, mit anderen Worten: die Belastung auf die Querschnittseinheit (qcm), unter der der Stab eine Verdoppelung seiner Länge erfährt. Für Eisen beträgt der Elastizitätsmodul 2000000. Man erkennt leicht, daß E in Zahlengrößen sich bewegt, die verwirrend wirken können. Spannungen von 2000000 atm vermag kein Eisen zu tragen; die Bruchfestigkeitszahlen für ein gutes Flußeisen schwanken zwischen 4200—5000 atm. — Die Querschnittszusammenziehung pflegt man nur nach dem Bruch des Stabes zu messen und in Prozenten, bezogen auf den ursprünglichen Querschnitt, anzugeben. Die Querschnittsverringerung der Flächeneinheit ist gegeben durch den Quotienten $\frac{f - f_1}{f}$, mithin ist die Querschnittsverminderung q in Prozenten des ursprünglichen Querschnittes:

$$q = 100\left(\frac{f - f_1}{f}\right) = 100\left(1 - \frac{f_1}{f}\right).$$

In der Praxis begegnet man häufig für q der wenig schönen Bezeichnung „Kontraktion".

Längenänderung und Querzusammenziehung stehen ihrer Größe nach innerhalb der Elastizitätsgrenze in bestimmter Beziehung. Es ist $\varepsilon_q = \varepsilon \frac{1}{m}$, worin m eine Konstante bedeutet, die erfahrungsgemäß zwischen 3 und 4 schwankt. Innerhalb der Elastizitätsgrenze ist also die Querzusammenziehung gleich $^1/_3$ bis $^1/_4$ der Längenänderung.

b) Messung der Belastungen. Prüfungsmaschinen. Einspannvorrichtungen.

Zur Messung der Belastungen, die der Probekörper erfährt, bedient man sich der Prüfungsmaschinen, die mit Einrichtungen versehen sind, um Kräfte zu erzeugen, und Meßvorrichtungen haben, mit denen die vom Probekörper aufgenommenen Kräfte gemessen werden können.

Die Kraftmesser der Maschinen geben gewöhnlich die Gesamtbelastung P in kg oder t an, bei einzelnen Konstruktionen auch die Spannungen σ in atm. Wo letzteres nicht der Fall, muß man vor dem Versuch die Abmessungen des für das Zerreißen in Frage kommenden Querschnittes, also des schwächsten am Stabe, mit geeigneten Meßwerkzeugen (Schublehre, Schraubenlehre) ermitteln und nach dem Versuch den Quotienten $\frac{P}{f} = \sigma$ errechnen.

Wegen der großen Mannigfaltigkeit, der man unter

den Konstruktionen der Prüfungsmaschinen begegnet, werden diese in einem späteren Abschnitte besonders behandelt werden, indessen sollen im folgenden schon die Einrichtungen, die zum Einspannen des Versuchsstückes beim Zugversuch dienen, kurz besprochen werden. — Zum Zerreißversuch ist es, wenn einwandfreie Ergebnisse erzielt werden sollen, erforderlich, daß die in Wirkung kommende Kraft P möglichst genau in der

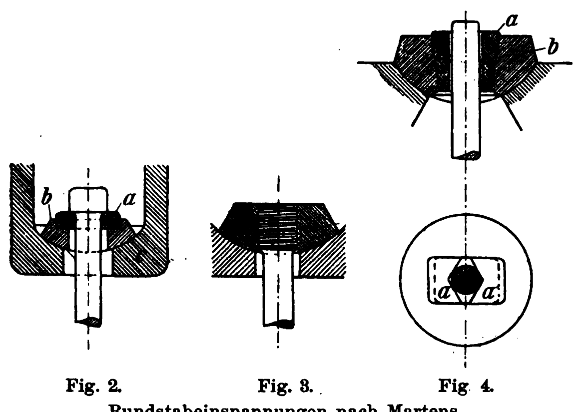


Fig. 2. Fig. 3. Fig. 4.
Rundstabeinspannungen nach Martens.

Längsachse angreift und alle seitlich auf Biegung wirkenden Kräfte ausgeschlossen werden. Dieser Bedingung muß in erster Linie schon bei der Konstruktion der Stabeinspannvorrichtungen Rechnung getragen werden, jedoch wird auch der aufmerksame und geschickte Beobachter sein Augenmerk beim Einbau des Versuchsstabes auf diesen Umstand richten müssen. Der Versuchsstab kommt beim Zugversuch entweder mit rechteckigem Querschnitt als sogenannter Flachstab (Blechabschnitte usw.)

oder mit rundem Querschnitt als Rundstab zur Verwendung. In beiden Fällen gibt man den Stabenden solche Form, daß sie bequem von den Einspannvorrichtungen der Maschine gefaßt und gehalten werden können. Auf die Einzelheiten der Formen und die Abmessungen der Versuchsstäbe wird später noch eingegangen werden. Die

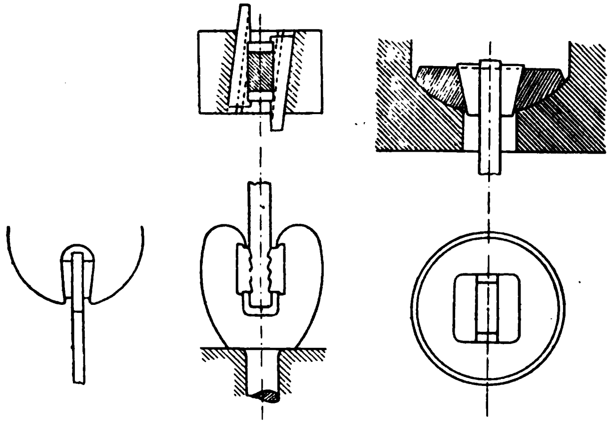


Fig. 5. Fig. 6. Fig. 7.
Flachstabeinspannungen nach Martens.

Bedingung der zentrischen Zugübertragung wird am leichtesten bei den Rundstabeinspannungen erzielt, bei denen der Stabkopf in Kugelschalen gelagert wird, so daß die Längsachse des Versuchsstabes sich von selbst in die Zugachse der Maschine einstellt, sobald durch die Antriebsvorrichtung der Maschine eine Zugkraft ausgeübt wird. Martens gibt in seiner „Materialienkunde" S. 40—43 eine Anzahl seiner Konstruktionen von Einspannvorrichtungen. In den Fig. 2—7 sind die am häufigsten ange-

wendeten wiedergegeben. Bei der Einrichtung nach Fig. 2, die die gebräuchlichste ist, umfassen ein Paar geteilter Ringe *a* den Stabschaft unterhalb des Stabkopfes, die Ringe *a* liegen in einem geschlossenen Ringe *b*, dessen untere Fläche kugelförmig abgedreht ist und Auflage auf der entsprechend gearbeiteten Kugelfläche der Einspannklaue *c* findet.

Eine andere Art der Einspannung veranschaulicht Fig. 3. Der Zerreißstab ist an den Köpfen mit Gewinde versehen und in eine Mutter eingeschraubt, deren Auflagefläche wiederum der Kugelfläche der Einspannklaue angepaßt ist. Eine weniger gebräuchliche Form der Rundstabeinspannung stellt Fig. 4 dar. Sie ermöglicht, Stäbe ohne besonderen Kopf einzuspannen. Der Stabschaft wird zwischen Beißkeilen *a* gehalten, die in den konischen Anlageflächen des mit Kugelfläche versehenen Stückes *b* geführt sind.

Flachstabeinspannungen zeigen die Fig. 5, 6, 7. Der etwas breiter als der Stabschaft gehaltene Stabkopf wird zwischen Beißkeilen mit konischen Auflageflächen gehalten. Die Beißflächen der Keile sind entweder mit Feilenhieb versehen oder haben eingefräste Zähne, die in die entsprechenden Nuten am Stabkopf eingreifen. Letztere Einspannungsart ist jedoch ungebräuchlich geworden, weil die Nuten im Stabkopf den Zähnen der Keile sehr genau angepaßt sein müssen, wenn nicht Biegungsbeanspruchungen auftreten sollen.

Fig. 7 veranschaulicht, in welcher Weise die Kugellagerung auch bei der Flachstabeinspannung Verwendung finden kann.

c) Messung der Längenänderungen.

Die Messung der Längenänderungen wird sich meist auf die Messung der bleibenden Dehnungen nach Abschluß des Zerreißversuches beschränken. Messungen

während des Versuches werden für gewöhnlich nur dann Anwendung finden, wenn es sich um Ermittelung der elastischen Eigenschaften des Materials, um Feststellung der Proportionalitätsgrenze (s. S. 16), der Dehnungszahl α oder von deren reziprokem Werte E (Elastizitätsmodul) handelt. Häufig wird auch die Beobachtung des Verlaufes der Dehnung während des ganzen Versuches Interesse haben, sei es zur schärferen Ermittelung der Fließgrenze, sei es, um aus der graphischen Auftragung der beobachteten Dehnungswerte Schlüsse über das Arbeitsvermögen des Materials (s. S. 57) ziehen zu können. Bei den feineren Arbeiten zur Feststellung der elastischen Eigenschaften wird man die Messungen immer mit sehr empfindlichen Meßapparaten (optischen, mikrometrischen) ausführen müssen, da die innerhalb der Proportionalitätsgrenze erfolgenden Längenänderungen außerordentlich kleine sind. Für die Messungen oberhalb der Streckgrenze genügen indessen gröbere Meßwerkzeuge (Papiermaßstäbe mit Millimeterteilung usw., s. S. 142). Eine Anzahl der gebräuchlichsten feinen und groben Meßwerkzeuge, ihre Handhabung, ihre Fehlerquellen sind ausführlicher in einem späteren Abschnitte behandelt (S. 141). —

Die Ermittelung der bleibenden Dehnung nach dem Bruch des Stabes, der sogenannten Bruchdehnung, wird für gewöhnlich bei jedem Zerreißversuch ausgeführt, da neben der Festigkeit überall auch die Bruchdehnung als Gütemaßstab für Beurteilung des Materials herangezogen wird. In der Praxis geschieht die Messung der Bruchdehnung fast allgemein in der Weise, daß man auf dem Stabschaft vor dem Versuch eine bestimmte Länge, die sogenannte Meßlänge (gewöhnlich 200 mm), durch Körnermarken abgrenzt, nach dem Zerreißen des Stabes die Bruchenden gegeneinander legt und nun durch Messung

feststellt, um wieviel sich die Länge zwischen den Körnermarken durch Dehnung vergrößert hat. Die Verlängerung pflegt man in Prozenten, bezogen auf die ursprüngliche Meßlänge, als Bruchdehnung anzugeben.

Dieses Meßverfahren, das seiner Einfachheit halber noch fast überall in der Praxis in Anwendung ist, liefert jedoch nicht immer einwandfreie Werte für die Dehnung. Die Größe der hiermit ermittelten Bruchdehnung ist in erheblichem Maße abhängig von der Lage der Bruchstelle des Zerreißstabes. Die Dehnung ergibt einen Höchstwert, wenn der Bruch in der Mitte des Stabes liegt; sie wird bei dem gleichen Material um so kleiner werden, je mehr die Bruchstelle nach den Stabköpfen zu liegt, was aus dem Folgenden erklärlich wird.

Um sich ein Bild von den Dehnungen der einzelnen Stabteile zu machen, teilt man zweckmäßig die ganze Länge des Stabschaftes bis an die Stabköpfe heran durch Einritzen von Strichmarken oder Einschlagen von Körnermarken in Abständen von 1 cm in gleiche Teile, unterwirft den Stab der Zerreißprobe und mißt nach dem Bruch die Länge der einzelnen Teilungsintervalle aus.

Bei graphischer Auftragung dieser Meßergebnisse nach Fig. 8 ergibt sich für den Verlauf der Dehnung über den ganzen Stabschaft bei Materialien mit ausgesprochener Formänderungsfähigkeit ein Linienzug ABC, wenn der Bruch in der Mitte der Stablänge erfolgt ist. Aus diesem Schaubild ist ersichtlich, daß die Dehnung der Stabteile in unmittelbarer Nähe der Bruchstelle erheblich größer ist, als diejenige der übrigen Stabteile, und daß ferner die Dehnung nach den Stabköpfen zu immer kleinere Werte ergibt. Die erstere Erscheinung ist damit zu erklären, daß der Stab an der Bruchstelle starke Einschnürung, also große Querschnittsverminderung erfährt. Sie beträgt

oft bei manchem Flußeisen bis zu 70 % des ursprünglichen Querschnittes und mit ihr erfolgt, weil Produkt f. l unverändert bleibt (s. S. 26), auch starke Längenänderung der benachbarten Stabteile, die sich indessen nur den in unmittelbarer Nähe der Bruch- und Einschnürstelle liegenden Stabteilen mitzuteilen pflegt. In der Nähe der Stabköpfe hingegen wirken der Dehnung Kräfte entgegen, die senkrecht zur Längsachse des Stabes gerichtet sind. An den Auflagestellen des Stabkopfes (s. Fig. 8) treten

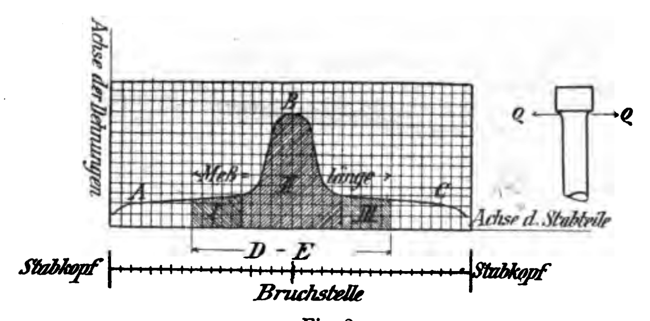


Fig. 8.
Dehnungen der einzelnen Stabteile
(Einschnürung in der Mitte der Meßlänge).

die Kräfte ϱ in Form von Reibungswiderständen auf, die verhindern, daß das Material in unmittelbarer Nähe des Stabkopfes frei nachgeben kann. Die Querzusammenziehung des Materials wird dort behindert und infolgedessen fällt auch die Längenänderung der benachbarten Stabteile entsprechend kleiner aus. Je größer der Abstand der Teilungsintervalle vom Stabkopf wird, um so geringer wird die Beeinflussung der Querschnittsverminderung und Dehnung durch die Kräfte ϱ, und damit erklärt sich der Verlauf des Linienzuges in Fig. 8.

Als Bruchdehnung gibt man nun die mittlere Ordinatenhöhe der schraffierten Fläche über der Linie *DE* an. Sie muß einen Höchstwert ergeben, wenn die Bruch- und Einschnürstelle und damit die größten Dehnungswerte, wie in Fig. 8, in der Stabmitte liegen; sie wird jedoch ein Mindestwert werden, wenn Bruch- und Einschnürstelle, wie in Fig. 9, an das Ende der Meßlänge *D—E* rücken, denn der Flächeninhalt der schraffierten Fläche *I*, *II*, *III* ist in Fig. 8 größer als in Fig. 9.

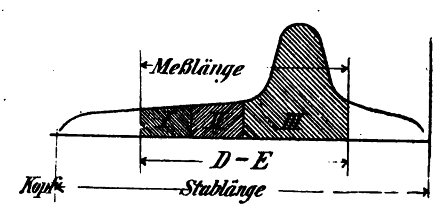


Fig. 9.
Einschnürung am Ende der Meßlänge.

Es ist aus diesem Grunde auch in der Praxis allgemein gebräuchlich, zur Dehnungsmessung mit dem oben geschilderten Verfahren nur solche Stäbe heranzuziehen, deren Bruchstelle innerhalb des mittleren Drittels der Stablänge liegt. Innerhalb dieser Grenze sind die Fehler der Bruchdehnungsmessung mit diesem Verfahren Größen, die für praktische Zwecke vernachlässigt werden können. Wollte man indessen die Dehnung nach diesem Verfahren auch an Stäben messen, deren Bruchstelle außerhalb des mittleren Stabdrittels liegt, so könnten die Dehnungswerte um mehrere Prozent zu klein ermittelt werden, was bei Abnahmeversuchen, denen als Abnahmebedingung eine bestimmte untere Grenze für die Dehnung zugrunde gelegt ist, für den Erzeuger der Ware unter

Umständen recht unangenehme wirtschaftliche Nachteile haben könnte. —

Um sich von den Fehlern dieses Meßverfahrens frei zu machen und, unabhängig von der Lage der Bruchstelle, alle Zerreißstäbe zur Dehnungsmessung heranziehen zu können, bedienen sich die öffentlichen Prüfungsanstalten und die wissenschaftlichen Untersuchungsstellen eines Meßverfahrens, das allerdings in der Praxis noch wenig Eingang gefunden hat, weil es etwas zeitraubender ist.

Das Meßverfahren gründet sich darauf, daß die Dehnung der Stabteile symmetrisch an beiden Seiten der Bruchstelle verläuft, d. h. daß ein Stabteil in einer beliebigen Entfernung x von der Bruchstelle nach dem linken Stabkopf zu die gleiche Längenänderung erfährt, wie ein Stabteil im gleichen Abstand x von der Bruchstelle nach dem rechten Stabkopf zu. Den Beweis hierfür liefert die Schaulinie in Fig. 8, die den Verlauf der Dehnungen über die ganze Stablänge angibt und durch eine große Zahl von Beobachtungen an den verschiedensten Prüfungsstellen bestätigt ist.

Um die Dehnungsmessung nach dem zu schildernden Verfahren vornehmen zu können, teilt man die Meßlänge des Stabes, deren Endpunkte zweckmäßig so weit von den Stabköpfen entfernt liegen, daß erhebliche Beeinflussung der Formänderung durch diese nicht mehr zu fürchten ist, durch Einritzen von Strichmarken oder Einschlagen von Körnermarken mit einem Doppelkörner in zwanzig Unterteile. Größe der Meßlänge und Abstand der einzelnen Strichmarken voneinander sind nach bestimmten Vorschriften zu wählen, die später eingehend erörtert sind (s. S. 45). Es sei hier nur bemerkt, daß bei einem sogenannten Normalrundstabe (Begriffserklärung s. S. 43) mit einem Schaftdurchmesser von 20 mm die Meßlänge 200 mm

beträgt und diese für gewöhnlich in der Mitte der ganzen Stablänge, die zwischen den Köpfen 360 mm ist, aufgetragen wird. An beiden Enden der Meßlänge bleiben somit noch 80 mm der Stablänge bis zu den Köpfen ungeteilt und werden zur Dehnungsmessung nicht herangezogen. Bei einer Teilung der Meßlänge in 20 Unterteile würden die einzelnen Teilungsintervalle mithin 10 mm lang werden. Die Strich- und Körnermarken werden zweckmäßig auf einem Längsriß aufgetragen (s. Fig. 10). Wenn nun, wie in Fig. 10 angedeutet, der Bruch des Stabes beim Zerreißen zwischen dem 4. und 5. Teilungsintervall erfolgt, so mißt man zur Feststellung der Bruchdehnung die Länge der Strecke vom Bruch bis zum Teilstrich Nr. 0 und vom Bruch bis zum Teilstrich Nr. 10. Die Summe beider Zahlen gibt die Länge einer Strecke, die vor dem Versuch 10 Teilungsintervalle, also 100 mm lang war.

Fig. 10. Rundstab mit Teilung für Bruchdehnungsmessung.

Würde sich bei der Messung nach dem Bruch z. B. eine Länge von 132 mm ergeben haben, so hätte sich die Strecke, die vor dem Versuch 100 mm lang war, um 32 mm gedehnt, das Material würde demnach 32 Prozent Bruchdehnung aufweisen. Man kennzeichnet die so gemessene Bruchdehnung durch die Bezeichnung δ_5, um mit dem Index anzudeuten, daß die Dehnungsmessung an je 5 Teilungsintervallen links und rechts von der Bruchstelle vorgenommen wurde. Wie ohne weiteres klar ist, muß dieser Wert δ_5 stark durch die Dehnung

der Einschnürstelle beeinflußt sein und daher bei sehr formänderungsfähigem Material erheblich zu hohe Werte für die Bruchdehnung des Materials ergeben. Man ermittelt deswegen die Bruchdehnung auch als δ_{10}, d. h. gemessen an je 10 Teilungsintervallen links und rechts von der Bruchstelle. Wenn wir diese Dehnungsmessung δ_{10} wiederum an dem Beispiele in Fig. 10 vornehmen, so ergibt sich, daß auf dem einen Stabende nur noch 5 Teilungsintervalle zur Ausmessung vorhanden sind. Nach der dem Meßverfahren zugrunde liegenden Tatsache, wonach die Dehnung der einzelnen Stabteile symmetrisch links und rechts von der Bruchstelle erfolgt, kann gefolgert werden, daß die zur Messung δ_{10} am oberen Stabende fehlenden Teilungsintervalle die gleiche Dehnung erfahren haben würden, wie die entsprechenden Intervalle am unteren Ende, also die Nr. 10 bis 15. Die Längenmessung am oberen Ende muß daher in diesem Falle durch Ausmessung der Strecke zwischen Teilstrich Nr. 10 und Nr. 15 ergänzt werden; δ_{10} würde sich also aus der Ausmessung der nachfolgenden Strecken zusammensetzen:

1. Teilstrich 15—Bruch (für Messung unterhalb vom Bruch),
2. „ 0—Bruch } für Messung oberhalb vom Bruch.
3. „ 10—15 „ }

Würde die Gesamtsumme dieser Ausmessungen einen Wert von 254 ergeben, so hätte eine Länge des Stabschaftes, die vor dem Versuch $20 \times 10 = 200$ mm lang war, sich um 54 mm gedehnt; das Material würde also in diesem Falle eine Bruchdehnung δ_{10} von $\frac{54 \cdot 100}{200} = 27\,\%$ aufweisen. Es sind im vorhergehenden Beispiel Zahlen gewählt worden, die den häufig beobachteten Werten für

weiches Flußeisen annähernd entsprechen, und es sei hinzugefügt, daß man bei der Lage der Bruchstelle in Fig. 10 mit der Dehnungsmessung, wie sie in der Praxis gebräuchlich und wie sie auf Seite 33 beschrieben ist, etwa 25% Dehnung ermittelt hätte. Da der Wert δ_{10} zweifellos die Bruchdehnung des Materials am richtigsten angibt — er verlegt wie die Messung δ_5 die Bruchstelle in die Mitte der zur Messung herangezogenen Strecke, zieht aber im Gegensatz zu δ_5 Stabteile in die Messung hinein, die von der großen Dehnung der Einschnürstellen nicht mehr beeinflußt sind —, so erkennt man, daß selbst im vorliegenden Falle, wo die Bruchstelle noch nahezu an den Grenzen des mittleren Stabdrittels liegt, die Dehnungsmessung der Praxis schon einen um etwa 2% zu kleinen Wert ergeben kann. Aus dem Vorhergehenden geht indessen auch hervor, daß der Wert δ_5 allein keinen zuverlässigen Maßstab für die Bruchdehnung des Materials zu geben vermag.

d) Beeinflussung der Messungsergebnisse.

Für die Feststellung der Bruchdehnung ist es sonach nicht gleichgültig, welches Meßverfahren zur Anwendung kommt. Aber auch bei Verwendung des zuverlässigsten Meßverfahrens sind noch eine Reihe anderer Gesichtspunkte zu beachten, wenn man einwandfreie, vor allem miteinander vergleichbare Ergebnisse für die Dehnungsmessung erhalten will. Die hierbei in Frage kommenden Umstände müssen wegen ihrer Wichtigkeit für die sachgemäße Auswertung von Versuchsergebnissen in den hauptsächlichsten Punkten hier kurz erörtert werden; für eingehenderes Studium muß auf die einschlägige Literatur (Materialienkunde) verwiesen werden. —

Zunächst ist es nicht gleichgültig, mit welcher Meß-

länge die Dehnungsmessung vorgenommen wird, besonders dann nicht, wenn man mit Materialien, die starke Einschnürung erfahren, zu tun hat. Schon aus dem über die Messung δ_5 (s. S. 34 u. 39) Gesagten geht hervor, daß eine Meßlänge, deren Begrenzungen zu nahe der Einschnürstelle liegen, keine mittlere Dehnung des Materials geben kann. Andererseits wird die Dehnungsmessung auch dann fehlerhaft beeinflußt werden, wenn ihre Begrenzungen zu nahe den Stabköpfen liegen und deren Einfluß (s. S. 35) sich geltend macht. Martens gibt in seinem Handbuch der Materialienkunde auf S. 94 Ergebnisse von Dehnungsmessungen an Rundstäben an, die sich bei gleichem Material für verschiedene Messungen wie folgt stellen:

Meßlänge:	l_t 20	l_t 10	l_t 5
Bruchdehnung δ %:	31.1	38.4	49.5

oder wenn man die Dehnung bei der Meßlänge $l_t\,20 = 100$ setzt, so ergeben die Zahlen folgendes Verhältnis:

$$l_t\,20 = 100; \quad l_t\,10 = 123.5; \quad l_t\,5 = 159.2.$$

Man erkennt hieraus den ganz erheblichen Einfluß der Meßlänge auf die Ergebnisse der Dehnungsmessung. —

Des weiteren ist jedoch auch die Querschnittsgröße des Versuchsstabes bei gleicher Meßlänge von Einfluß auf das Dehnungsergebnis. Versuche von Bauschinger (Mitteilungen des mech.-techn. Labor. d. techn. Hochschule München, Heft 6) und Martens (Materialienkunde) beweisen, daß die Meßlängen sich wie die Wurzeln aus den Stabquerschnitten verhalten müssen, wenn Stäbe aus gleichem Material, aber von verschiedenem Querschnitt gleiche Dehnungswerte ergeben sollen. Weniger kommt

der Einfluß der Querschnittsform auf die Dehnungsergebnisse zum Ausdruck. —

Die mannigfachen, durch zahlreiche Versuchsergebnisse der verschiedensten Prüfungsstellen belegten Erfahrungen über die Abhängigkeit der Festigkeitsergebnisse von den Abmessungen der Probekörper haben dazu geführt, daß die öffentlichen und wissenschaftlichen Prüfungsstellen mehr und mehr dazu übergegangen sind, diese Abmessungen so zu bemessen, daß dem sogenannten Ähnlichkeitsgesetze Rechnung getragen wird und dadurch die an verschiedenen Prüfungsstellen mit Körpern verschiedener Abmessungen gewonnenen Versuchsergebnisse miteinander vergleichbar werden. Nach dem Gesetz der Ähnlichkeiten, wie es Barba bezeichnet hat, oder dem Gesetz der proportionalen Widerstände, wie es von Kick genannt wird, erfahren geometrisch ähnliche Körper aus dem gleichen Material unter gleichen Umständen durch die gleichen Spannungen geometrisch ähnliche Formänderung.

Nach diesem Gesetze kann man vergleichbare Versuchsergebnisse mithin nur dann erwarten, wenn die sämtlichen in Frage kommenden Abmessungen untereinander in bestimmtem Verhältnis stehen, die Versuchskörper also geometrisch ähnlich sind.

Berücksichtigung dieses Gesetzes ist um so mehr geboten, als der Einfluß der Stababmessungen sich nicht nur auf die Ergebnisse der Formänderungsmessungen beschränkt, sondern sich auch auf die Festigkeitszahlen erstreckt. Martens gibt in seinem Handbuch der Materialienkunde auf Seite 105 eine übersichtliche Zusammenstellung der nach dieser Richtung hin überaus lehrreichen Versuche von Barba, die in der nachstehenden Tabelle wiedergegeben ist:

Breite b	30	14	30	14	30	14
Dicke a	14	14	6	14	6	6
Querschnitt f	420	186	180	186	180	84
Meßlänge l	200	10	10	0	0	0
$l/\sqrt{f}$	9.8	0.7	0.7	0	0	0
σ_B	42.0	43.5	44.0	45.7	57.1	60.4
δ_l	30.5	65.0	40.0	—	—	—
q	61.8	51.3	49.8	sehr gering	fast 0	fast 0

Man erkennt hieraus deutlich den Einfluß der Stabform auf die Festigkeitsergebnisse.

e) Stabformen für den Zugversuch.

Für den Rundstab hat sich in Deutschland, besonders an den öffentlichen Prüfungsstellen, fast überall der Normalstab mit 20 mm Schaftdurchmesser und 200 mm

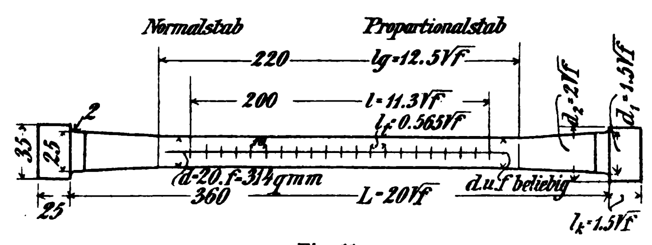


Fig. 11.
Normal- und Proportionalrundstab des Materialprüfungsamtes.

Meßlänge eingebürgert. Ihn hat auch die ehemalige Kgl. Mechanisch-technische Versuchsanstalt zu Charlottenburg, das jetzige Materialprüfungsamt zu Groß-Lichterfelde, als Grundlage für ein Stabsystem, das dem Ähnlichkeitsgesetz Rechnung trägt, angenommen. Der Normalrundstab ist in Fig. 11, wie er in den „Vorschriften für die

Benutzung des Kgl. Materialprüfungsamtes“ angegeben ist, dargestellt. Er hat an beiden Enden zwecks Einspannung in die Prüfungsmaschine Stabköpfe von 35 mm Durchmesser und 25 mm Höhe und zwischen den Köpfen eine Stablänge von 360 mm. An den Stabköpfen setzt der Stabschaft mit einer Hohlkehle von 2 mm Radius zunächst konisch an, der Durchmesser des Schaftes am Stabkopf beträgt 25 mm und verjüngt sich auf eine Länge von 70 mm bis auf 20 mm Durchmesser, um dann zylindrisch mit 20 mm Durchmesser auf eine Länge von 220 mm durchgeführt zu werden. Diese Länge von 220 mm, die für die Ermittlung der Versuchsergebnisse in Frage kommt, wird mit Gebrauchslänge (Zeichen lg) bezeichnet. Auf ihr wird die Teilung in Zentimeter zur Messung der Bruchdehnung aufgeritzt und zwar auf eine Länge von 200 mm, deren Endmarken symmetrisch zur Gebrauchslänge liegen und die mit Meßlänge (Zeichen l) bezeichnet wird. Die Teilung umfaßt demnach 20 Teilungsintervalle von je 1 cm Länge, und ihre Endmarken liegen beiderseitig 1 cm von der Begrenzung der Gebrauchslänge entfernt. Durch den konischen Übergang zwischen Stabkopf und Gebrauchslänge werden die Beeinflussungen der Meßlänge durch den Stabkopf vermindert; durch Anbringung der Hohlkehle am Stabkopf wird ein scharfer Übergang zwischen zwei verschieden großen Stabquerschnitten vermieden. Damit wird der Erfahrung Rechnung getragen, daß das Material an solchen Übergangsstellen, wenn sie scharfkantig gehalten sind, leicht zum Bruch gebracht wird, eine Erscheinung, die sich besonders bei harten Materialien (Gußeisen) fast immer bestätigt findet. —

Wo aus irgendwelchen Gründen (Materialmangel usw.) die Anfertigung des Normalrundstabes nicht angängig ist, wird den Versuchskörpern die Form des sogenannten

Proportionalstabes gegeben; d. h. die Abmessungen werden so gewählt, daß sie im bestimmten Verhältnis zu denen des Normalstabes stehen. In erster Linie wird auf proportionale Bemessung der Meßlänge gesehen. Maßgebend hierfür ist der Quotient $n = l/\sqrt{f}$, d. h. Verhältnis der Meßlänge zur Wurzel aus dem Stabquerschnitt f, der natürlich innerhalb der Gebrauchslänge zu ermitteln ist. Dieser Quotient n ist für den Normalrundstab $= 200/\sqrt{314} = 11.3$. Die Meßlänge für jeden Proportionalstab errechnet sich hiernach aus dem Produkt $l = 11.3\sqrt{f}$; diese Meßlänge wird in jedem Falle in 20 Teilungsintervalle geteilt, so daß sich die auf der Meßlänge aufzutragende Teilung für jeden Proportionalstab beliebigen Querschnittes errechnet zu $\frac{11.3\sqrt{f}}{20} = 0{,}565\sqrt{f}$. Auch die übrigen Abmessungen des Proportionalstabes werden in bestimmtem Verhältnis zum Stabquerschnitt gewählt. In Fig. 11 sind auf der linken Stabseite die Abmessungen des Normalrundstabes, auf der rechten diejenigen des Proportionalstabes angegeben. —

In ähnlicher Weise sind auch die Abmessungen für einen Normalflachstab gleichfalls nach den „Vorschriften des Königl. Materialprüfungsamtes“ festgelegt. Fig. 12 zeigt wiederum auf der linken Stabseite die Abmessungen des Normalstabes, auf der rechten diejenigen für den Proportionalflachstab. Beim Flachstab, dessen Querschnitt rechteckig ist, wird die Dicke des Stabes meistens gegeben sein, weil es gebräuchlich ist, besonders bei Zerreißproben mit Blechen usw., die Walzhaut auf dem Stabe zu belassen; man wird also, um Zeit und Arbeit bei der Probenherstellung zu sparen, aus dem zu prüfenden Bleche einfach Streifen von solcher Breite herausarbeiten,

daß unter Beibehaltung der ursprünglichen Dicke des Bleches der Querschnitt des Versuchsstabes, also das Produkt aus Breite mal Dicke, passende Abmessungen erhält, indessen soll das Verhältnis Dicke zu Breite in den Grenzen zwischen 1 : 1 und 1 : 5 bleiben. —

Dieses ganze System der Stabformen für Zerreißversuche, in erster Linie mit Metallen, das, wie erwähnt, für die Probenbearbeitung beim Königl. Materialprüfungsamt in Groß-Lichterfelde maßgebend ist, sollte sich all-

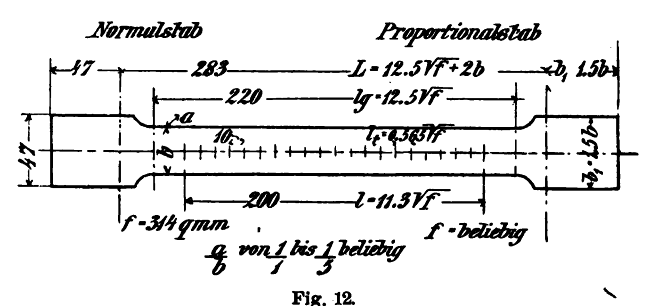


Fig. 12.
Normal- und Proportionalflachstab des Materialprüfungsamtes.

gemeinere Geltung im Materialprüfungswesen verschaffen. Es trägt allen versuchstechnischen Erfahrungen Rechnung und läßt sich auch für Ausführung der gewöhnlichen Materialprobe im praktischen Betriebe ohne große Umstände durchführen, wenn nur erst einmal die ganze Probenherstellung und die dabei zu verwendenden Werkzeuge und Geräte darauf zugeschnitten wurden. Im Interesse einwandfreier Vergleichbarkeit von Versuchsergebnissen, die an den verschiedensten Stellen erzielt wurden, ist Einheitlichkeit in der Probenabmessung in erster Linie wünschenswert. Zum mindesten sollte man nach dem

Vorschlage von Martens (Handbuch d. Materialienkunde S. 109) die Angaben für die Bruchdehnung des Materials dadurch kennzeichnen, daß man dem Zeichen für die Bruchdehnung δ als Index die Verhältniszahl $n = l/\sqrt{f}$ hinzusetzt; für den Normal- und Proportionalstab würde zu schreiben sein: $\delta_{11 \cdot 3}$ für die Dehnungsmessung, ermittelt auf zehn Teilintervalle links und rechts von der Bruchstelle, $\delta_{5 \cdot 65}$ für die Dehnungsmessung, ermittelt auf fünf Teilungsintervalle links und rechts von der Bruchstelle.

f) Verlauf des Zugversuches (Flußeisen).

Nachdem nunmehr die Begriffserklärungen, soweit sie zum Verständnis der Vorgänge beim Zugversuch in

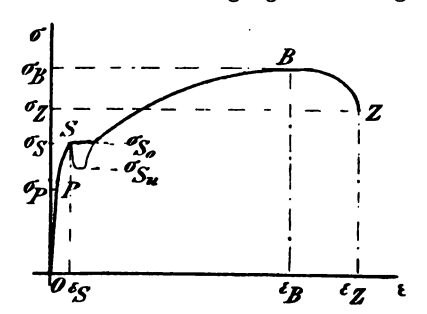


Fig. 13.
Verlauf des Zugversuches mit weichem Flußeisen.

Frage kommen, gegeben wurden, soll im folgenden an Hand der graphischen Darstellung des Ergebnisses eines Zugversuches in Fig. 13 auf den Verlauf des Versuches selbst noch näher eingegangen werden.

Die Schaulinie in Fig. 13, in der die Spannungen als Ordinaten, die Formänderungen als Abszissen aufgetragen wurden, ist charakteristisch für den Verlauf des Zug-

versuches mit einem ausgeprägt formänderungsfähigen Material mit Proportionalität (s. S. 16), also z. B. einem weichen Flußeisen.

Wie ersichtlich, können die Spannungen zu Beginn des Versuches stetig gesteigert werden, ohne daß größere Formänderungen zu ermitteln sind; die Linie der Dehnungen ε als Funktion der Spannungen σ verläuft in gerader Linie, unter einem geringen Winkel geneigt gegen die Ordinatenachse. Für gleiche Spannungssteigerungen erfährt das Material mithin während dieser Versuchsperiode gleiche Zunahmen der Dehnung, es besteht „Proportionalität" zwischen Belastung und Formänderung; die Dehnungen sind zudem so klein, daß sie nur mit sehr empfindlichen Meßinstrumenten (Spiegelapparate usw. s. S. 143) beobachtet werden können. Die Formänderungen müssen nach dem auf Seite 16 Erörterten elastische sein, bei stufenweiser Aufhebung der Belastung würde der Linienzug für die Entlastung mithin zusammenfallend mit der Linie $O - P$ verlaufen. Bei dem mit P bezeichneten Punkte beginnt die Schaulinie sich schwach zu krümmen, die erfolgenden Formänderungen nehmen also schneller zu als die Belastungen, die Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung hat aufgehört, die Spannung an der Proportionalitätsgrenze σ_P (s. S. 25) und diese selbst sind also überschritten. Die Dehnungen sind indessen an sich noch immer klein, bei Entlastung des Versuchsstabes werden jedoch schon geringe bleibende Verlängerungen mit genügend feinen Meßapparaten feststellbar sein, denn auch die Elastizitätsgrenze des Materials, die nahezu mit der Proportionalitätsgrenze zusammenfällt (s. S. 16), ist nunmehr überschritten.

Die schwache Krümmung der Schaulinie hält an bis zum Punkte S; die Spannung kann bis dahin, ohne daß

die Belastungsgeschwindigkeit erhöht werden muß, stetig gesteigert werden. Bei *S* beginnt die Schaulinie plötzlich nahezu asymptotisch zur Abszissenachse zu verlaufen, häufig findet sogar ein augenblickliches Abfallen der Spannung statt, was durch die dünn gezeichnete Linie angedeutet werden soll (Bachs „obere“ und „untere“ Streckgrenze s. S. 19). Es erfolgen nun größere bleibende Formänderungen, das Material „fließt“ (s. S. 17), die Spannung an der Fließ- oder Streckgrenze σ_S ist überschritten. Ohne erhebliche Steigerung der Belastungsgeschwindigkeit, die man aus versuchstechnischen Rücksichten vermeidet, schon um die möglichst scharfe Beobachtung der charakteristischen Spannungsgrenzen nicht zu stören, wird beim Überschreiten der Fließgrenze zunächst keine Spannungssteigerung mehr feststellbar sein; bei manchen Materialien wird sogar, wie schon erwähnt, ein Spannungsabfall zu beobachten sein, selbst wenn der Krafterzeuger der Prüfungsmaschine andauernd in Betrieb bleibt. Die von letzterem in diesem Versuchsabschnitte erzeugte mechanische Arbeit wird eben vollständig in Formänderungsarbeit umgesetzt, reicht in manchen Fällen sogar nicht mehr aus, um die bereits erzeugte Spannnng im Versuchsstabe hoch zu halten. Es stellt sich mithin ein neuer Gleichgewichtszustand ein, der andauert, bis das eigentliche Fließen des Materials beendet und dieses wieder für Spannungssteigerung aufnahmefähig wird. An der Prüfungsmaschine kennzeichnet sich das Erreichen der Fließgrenze meistens am Abfall des Wagehebels oder des Zeigers der Anzeigevorrichtung, mit der die Belastungen gemessen werden, weil die während der Fließperiode vom Krafterzeuger zugeführte Kraft als Formänderungsarbeit im Stabe aufgezehrt wird und auf den Kraftmesser und die



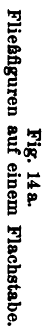


Fig. 14a. Fließfiguren auf einem Flachstabe.

Anzeigevorrichtung zunächst keine Belastungssteigerung übertragen wird.

Am Versuchsstab erkennt man Überschreitung der Fließgrenze an den nunmehr mit groben Hilfsmitteln (Anlegemaßstäbe mit Millimeterteilung usw.) meßbaren Dehnungen; es zeigt sich auch bald eine Oberflächenveränderung; die bisher blanke Oberfläche eines Rundstabes z. B. wird matt, beim Flußeisen krispelig, beim Messing knitterig usw. Flachstäbe, auf denen die Walzhaut belassen wurde, werfen diese ab; der im Vergleich zum Kernmaterial erheblich härtere und weniger dehnbare Walzzunder vermag der schnell fortschreitenden Dehnung des Kernmaterials nicht zu folgen, der Zusammenhang des Zunders wird gestört und dieser springt daher ab. Häufig geschieht dies so heftig, daß man die dadurch verursachten Geräusche wahrnehmen kann.

Das Fließen des Materials geht in der Regel von einem Querschnitt aus, indessen sind

hier und da auch mehrere Ausgangsstellen zu beobachten. Vielfach liegen die Ausgangsstellen, besonders beim Flachstabe, in der Nähe der Stabköpfe; auch beim Rundstab kann man oft beobachten, daß das Fließen nicht in der Stabmitte, sondern außerhalb der Meßlänge l beginnt. Außerordentlich interessant ist die Beobachtung des Fließvorganges an einem Flachstabe, dessen Breitseiten von Zunder befreit und poliert sind. Man kann auf ihnen deutlich die sogenannten Fließfiguren erkennen, Linien, die sich zunächst an der Ausgangsstelle des Fließens unter 45° gegen die Stablängsachse geneigt zeigen, nach und nach mit großer Schnelligkeit über die ganze Staboberfläche verlaufen, dieser ein moiréartiges Aussehen gebend, und schließlich mit wachsender Spannung wieder verschwinden. Auch das Abspringen des Walzzunders pflegt längs solcher Linien unter 45° gegen die Längsachse des Stabes zu erfolgen. Konstruktionsteile, wie Träger, U- oder T-Eisen, die auf ihrer Oberfläche solche durch Abspringen des Zunders erzeugte Figuren zeigen, lassen immer darauf schließen, daß sie eine Belastung über ihre Fließgrenze erfahren haben, und mahnen, wenn sie etwa in einem fertigen Bauwerk, z. B. einer Brücke usw., gefunden werden, jedenfalls zur Vorsicht.

Fig. 14b.
Fließfiguren auf einem Rundstabe.

In Figur 14 und 15 sind charakteristische Erscheinungen von Fließfiguren wiedergegeben.



Fig. 15.
Fließfiguren, entstanden durch Abspringen von Walzzunder, bei einem auf Biegung belastetem I-Träger.

Die Schaulinie in Fig. 13 steigt oberhalb des Punktes S stark gekrümmt an bis zum Punkte B. Das Material erfährt nach Überwindung der Fließperiode wiederum eine Spannungssteigerung, indessen sind die dabei erfolgenden Dehnungen sehr große und stetig zunehmende. Schließlich verläuft die Kurve nahezu asymptotisch auf den Punkt B zu, der die höchste Ordinate des ganzen Schaubildes, also die größte vom Stabe getragene Spannung darstellt. Das Material ist damit an der Grenze seiner Tragfähigkeit angekommen, die Spannung an der Bruchgrenze σ_B also erreicht. Die Brucherscheinung selbst ist bei den einzelnen Materialien verschieden. Materialien, für die der Verlauf der Schaulinie in Fig. 13 charakteristisch ist, pflegen nicht augenblicklich bei Erreichung der Bruchbelastung zu Bruche zu gehen; dem Bruche geht vielmehr eine mit Spannungsabfall verbundene starke örtliche Einschnürung oder Querschnittsverminderung an einem, manchmal auch an mehreren Querschnitten voraus. Ist die Zähigkeit des Materials überwunden und die Grenze der Dehnbarkeit des Materials in einer Einschnürstelle erreicht, so kommt der Stab in dieser Einschnürung zum Zerreißen. Den dem Bruche gewöhnlich voraus*gehenden* Spannungsabfall kennzeichnet

der Linienzug B—Z in Fig. 13, Punkt Z bezeichnet die Spannung, die der Stab im Augenblicke des Zerreißens noch zu tragen vermochte, die sogenannte Zerreißspannung σ_Z, die indessen für gewöhnlich nicht ermittelt wird, weil die Lastanzeiger nur weniger Prüfungsmaschinen ihre Beobachtung ohne größere Umstände gestatten.

g) Brucherscheinungen und Bruchflächen.

Nur selten pflegt die Bruchfläche des Stabes ebene Form zu haben, weitaus häufiger, besonders bei den Materialien, die starke Einschnürungen zeigen, tritt sogenannte Trichterbildung ein, wobei an dem einen Probenende Kegel- oder Pyramidenbildung, an dem anderen Ende die entsprechende trichterförmige Vertiefung ausgeprägt wird. Erklärung für diese Erscheinung ist darin zu suchen, daß der Beginn des Bruches nicht, wie man annehmen sollte, an den äußeren Stabfasern beginnt, die inneren Stabfasern vielmehr zuerst zum Zerreißen kommen und daher bis an die Grenze ihrer Dehnbarkeit beansprucht sind, die bei den außen liegenden Fasern nicht erreicht wird. Häufig zeigt sich auch eine kreisförmige ebene Grundfläche mit hervorragenden Rändern an dem einen Stücke, während das andere Stück an den Rändern entsprechende Kegelflächen zeigt. Sehr zähe Materialien (z. B. Blei) pflegen sich vollkommen zur Spitze auszuziehen, wohingegen harte, wenig formänderungsfähige Materialien (Gußeisen, harter Stahl) meist ebene Bruchflächen zeigen. Auch Flachstäbe zeigen die dem Material eigentümlichen Bruchflächen, indem ebenfalls Trichterbildung oder ebene Bruchfläche zu beobachten ist. Oft machen sich bei den Bruchflächen der Flachstäbe indessen Einflüsse geltend, die bewirken, daß die Bruchflächen *nicht senkrecht* zur Stablängsachse, sondern unter einem

Winkel geneigt gegen diese sich bilden, was entweder auf nicht zentrische Zugbeanspruchung oder auf Materialeigentümlichkeiten zurückzuführen ist.

Fig. 16 gibt eine Reihe von Brucherscheinungen wieder.



Fig. 16a.
Brucherscheinung (Trichterbildung) beim Zerreißversuch mit einem Rundstabe (Flußeisen).

Außerordentlich wichtig für die Materialbeurteilung ist die möglichst vollständige Beschreibung der Bruchfläche, weswegen öffentliche Prüfungsstellen stets eine solche ihren Prüfungszeugnissen beizugeben pflegen. Sie umfaßt in der Regel die Angabe der Form der Bruchfläche, der Farbe und der Art des Gefüges. Besonders die Art des Gefüges unterliegt großer Mannigfaltigkeit,

weswegen hier nur auf das Hauptsächlichste kurz eingegangen werden kann. Das Gefüge kann körnig und zwar grobkörnig (z. B. Gußeisen) oder feinkörnig (z. B. harter Stahl) sein; es kann ferner schuppige Struktur, kurzschuppige oder feinschuppige (z. B. Flußeisen), zeigen. Man begegnet auch sehnigem (Schweißeisen), blätterigem, faserigem, kristallinischem Gefüge.



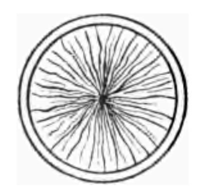
Fig. 16b.
Brucherscheinung beim Zerreißversuch mit einem Rundstabe (Eisenwickellegierung).

Eine Reihe von Materialien, z. B. Glas, Pech usw., zeigen überhaupt keine ausgeprägte Gefügeform, sie werden daher auch kurz gefügelose genannt.

Interessant zu beobachten sind die Beeinflussungen, denen die Bildung der Gefügeformen unterworfen ist. Weiches Flußeisen liefert auch hierfür wiederum das lehrreichste Beispiel. Auf der Bruchfläche eines Zerreißstabes aus Flußeisen pflegen sich für gewöhnlich zwei

Gefügezonen auszuprägen. Der Kern zeigt ein kurzschuppiges mattgraues Gefüge, wohingegen am Rande ein feinschuppiges glänzendes Gefüge zu beobachten ist. Nach den allgemein geltenden Anschauungen über die Spannungsverteilung in einem Stabe, der dem Zugversuch unterworfen wird, werden, wie schon S. 53 erwähnt, die mittleren Fasern am stärksten beansprucht und kommen zuerst zum Bruch. Das Gefügebild des Flußeisens scheint diese Annahme zu bestätigen, denn dem stark formgeänderten Materialabschnitte pflegt ein kurzschuppiges Gefüge eigentümlich zu sein, während körniges Gefüge in der Regel auf vorausgegangene geringere Formänderung schließen läßt. Die verschiedenen Eisensorten haben im Naturzustande alle mehr oder weniger körniges Gefüge, wie man sich leicht überzeugen kann, wenn man einen Flußeisenflachstab, der auf der einen Breitseite mit einer Kerbe versehen ist, in dieser Kerbe durch Biegung um eine Kante zum Bruch bringt. An den Rändern der Bruchfläche des Flußeisenrundstabes hat das Material infolge geringerer Formänderung mehr seine natürliche Struktur erhalten, als in der Mitte des Stabes, wo die Dehnbarkeit des Materials bis an die äußerste Grenze in Anspruch genommen wurde. — Häufig zeigen sich auf der Bruchfläche strahlenförmige Gebilde (s. Fig. 17), die, von einem Punkte ausgehend, radial nach allen Richtungen verlaufen. Nicht immer liegt, wie anzunehmen wäre, der Ausgangspunkt des Strahlenbündels in der Stabmitte; indessen wird man, wo dies nicht der Fall, in dem Ausgangspunkt des Strahlenbündels bei genauerer Untersuchung gewöhnlich Fehlstellen im Material entdecken. Es hat große Wahrscheinlichkeit für sich, daß der Bruch des Stabes vom Mittelpunkt des Strahlenbündels ausgeht. Bei harten Materialien, die gegen jede Oberflächenver-

letzung, wie sie z. B. durch das Aufritzen der Teilung auf den Zerreißstab verursacht wird, empfindlich sind, pflegt der Bruch häufig in einer dieser Strichmarken zu erfolgen. Das Gefügebild zeigt dann meistens den Ausgangspunkt des Strahlenbündels am Rande, da, wo die Strichmarke eingeritzt war (s. Fig. 18). Nicht selten sind auch, besonders wiederum bei Flußeisen (auch bei Legierungen wie Messing, Bronzen usw.), Gefügebilder, bei denen mitten im kurzschuppigen Gefüge körnige Einlagen zu beobachten sind. Sie deuten immer auf härtere



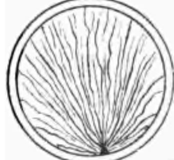


Fig. 17 u. 18.
Brucherscheinung.

Materialzonen und beweisen, daß das Material nicht homogen, also aus Zonen mit verschiedener Formänderungsfähigkeit zusammengesetzt war.

h) Arbeitsvermögen, Völligkeitsgrad.

Ein Schaubild, wie es in Figur 13 dargestellt ist, veranschaulicht, wie aus dem Vorhergehenden ersichtlich, den ganzen Verlauf des Zugversuches. Es gibt aber nicht nur für jede Spannungsstufe die zugehörige Dehnung an, vermag vielmehr auch über das Arbeitsvermögen des geprüften Materials den gewünschten Aufschluß zu geben.

Die graphische Auftragung des Versuchsergebnisses ist, wie erwähnt, in der Weise erfolgt, daß als Ordinaten

die Spannungen, also die auf die Querschnittseinheit ausgeübte Kraft, als Abszissen hingegen die Dehnungen der Längeneinheit, mithin der Weg eines Körperteiles von der Länge $l = 1$ aufgetragen wurden. Das Produkt beider Größen, Kraft mal Weg, also der Flächeninhalt der von der Schaulinie umschlossenen Fläche muß mithin eine Arbeit darstellen, und zwar die Arbeit, die die Raumeinheit des Materiales an Widerstand dem Zerreißen entgegenzusetzen vermag. Dieser Widerstand wird das Arbeitsvermögen des Materiales genannt. Es ist ein leichtes, seine Größe aus dem Schaubild zu ermitteln, indem man entweder den Flächeninhalt durch Planimetrieren ermittelt oder ihn mit anderen Methoden bestimmt. Martens empfiehlt (Materialienkunde S. 27) nachstehendes Verfahren. Für eine genügend genaue Annäherungsrechnung zur Bestimmung dieses Flächeninhaltes bildet man die Summe des Inhaltes mehrerer Rechtecke, die man in die Fläche hinein beschreibt und deren Begrenzungslinien die Schaulinien so schneiden, daß außerhalb der Schaulinienfläche fallende Flächenteile der einbeschriebenen Rechtecke angenähert die gleiche Größe haben, wie Flächenabschnitte innerhalb der Schaulinie, die nicht in die einbeschriebenen Rechtecke fallen. Praktische Durchführung dieses Verfahrens an einem Zahlenbeispiel, dessen Größen einem Zugversuche mit Flußeisen entnommen sind, ist nachfolgend gegeben. Fig. 19 zeigt die graphische Auftragung der Versuchsergebnisse, wobei zur bequemen Ausmessung der Rechteckseiten quadriertes Papier benutzt wurde. Die Dehnungsauftragung ist in einem Maßstabe erfolgt, der besonders deutlich den Dehnungsverlauf oberhalb der Streckgrenze darstellt, hingegen den elastischen Teil der Formänderungen nicht erkennen läßt. Das Arbeitsvermögen Σa des

Materials errechnet sich in diesem Falle als Summe des Flächeninhaltes der drei Rechtecke J_I, J_{II}, J_{III}.

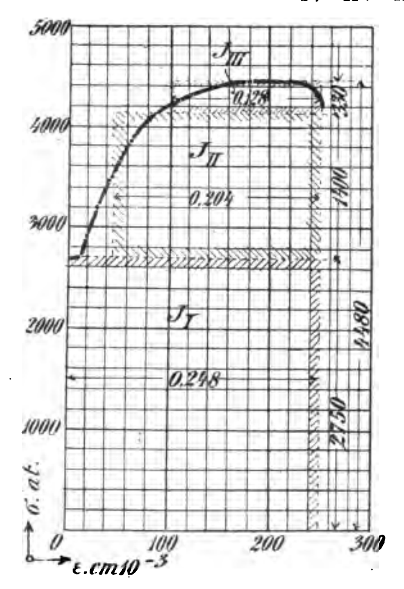


Fig. 19.
Bestimmung des Arbeitsvermögens nach Martens.

$$\begin{aligned} J_I &= 2750 \cdot 0{,}248 = 682 \\ J_{II} &= 1400 \cdot 0{,}204 = 286 \\ J_{III} &= 330 \cdot 0{,}128 = 42 \\ \hline \Sigma a &= 1010 \frac{\text{cmkg}}{\text{ccm}}. \end{aligned}$$

Die Raumeinheit des vorliegenden Materials setzt mithin ihrer Formänderung bis zum Zerreißen als

Widerstand eine Arbeit von 1010 cmkg entgegen. Dieser Wert, dividiert durch das spezifische Gewicht des Flußeisens $= \sim 7{,}8$, ergibt

$$\Sigma a = \frac{1010}{7{,}8} = 130 \frac{\text{cmkg}}{\text{gr}},$$

das Arbeitsvermögen der Gewichtseinheit des Materials.

Nach den Feststellungen verschiedener Forscher (Tetmajer, Hartig u. a.) steht nun das Arbeitsvermögen, also der Flächeninhalt der von der Dehnungsschaulinie umschriebenen Fläche, bei den verschiedenen Materialien in einem annähernd konstanten Verhältnis zum Inhalt des die Schaulinie umschreibenden Rechteckes, dessen eine Seite den Wert für die höchste Spannung, also die Bruchspannung, und dessen andere Seite den Wert für die größte Dehnung, also die Bruchdehnung darstellt. Diese Verhältniszahl ξ bezeichnet man mit „Völligkeitsgrad“, ihre Größe ist gegeben durch die Gleichung:

$$\xi = \frac{\Sigma a}{a_1},$$

worin Σa das oben erläuterte Arbeitsvermögen, a_1 den Inhalt des umschreibenden Rechteckes, das sich errechnet aus der höchsten erreichten Spannung (σ_B) und der größten beobachteten Dehnung (Bruchdehnung, angenähert ε_Z), bedeutet. Für das oben angegebene Beispiel ist $a_1 = 4480 \cdot 0{,}248 = 1110$, mithin der Völligkeitsgrad

$$\xi = \frac{1010}{1110} = 0{,}91 .$$

Für Flußeisen schwankt der Völligkeitsgrad zwischen 0,89—0,93, für Kupfer und seine Legierungen (Messing usw.) ist er kleiner, etwa 0,85.

Es ist sonach möglich, auch wenn keine Dehnungsmessungen während des Versuches vorgenommen wurden und graphische Darstellungen des ganzen Dehnungsverlaufes nicht vorliegen, das Arbeitsvermögen des Materiales zu ermitteln, selbst wenn, wie dies bei den gewöhnlichen Zerreißversuchen in der Praxis Gebrauch ist, nur Bruchspannung und Bruchdehnung festgestellt wurden, denn das Arbeitsvermögen ist

$$\Sigma a = \sigma_B \cdot \varepsilon_Z \cdot \xi \, .$$

i) Verlauf des Versuches mit anderen Metallen (Gußeisen, Kupfer).

Es soll nicht unterlassen werden, nochmals darauf aufmerksam zu machen, daß die wichtigsten Eigentümlichkeiten beim Verlauf eines Zugversuches mit einem

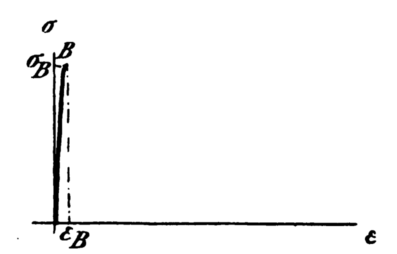


Fig. 20.
Zugversuch mit Gußeisen.

Material als Beispiel erörtert wurden, das alle charakteristischen Erscheinungen besonders scharf zum Ausdruck bringt. Wie schon auf Seite 18 erwähnt, verhalten sich nicht alle Materialien in bezug auf charakteristische Spannungsstufen (*P*-grenze, *S*-grenze usw.) so wie das

Flußeisen. Wenig formänderungsfähige Körper, wie Gußeisen z. B., liefern Dehnungsschaubilder, wie sie Fig. 20 zeigt. Bei solchem Material kann weder von Proportionalitäts-, noch von Streckgrenze gesprochen werden. Das Material zeigt auch vor dem Bruche keine Einschnürung, und seine Bruchdehnung wird sich in Größen bewegen, die kaum mit den gewöhnlichen Meßwerkzeugen feststellbar sind. — Wiederum anderen Verlauf nehmen die Dehnungsschaubilder für Kupfer (Fig. 21). Die dargestellte

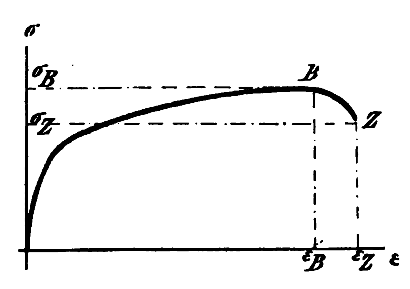


Fig. 21.
Zugversuch mit Kupfer.

Schaulinie kann indessen nicht als allgemein zutreffend für das Material gelten, denn die verschieden behandelten Kupfersorten zeigen unter sich vielfach verschiedenartiges Verhalten beim Zugversuch. Schwierigkeiten bei der Ermittlung der *P*- und *S*-grenze bereiten oft auch Flußeisensorten, besonders diejenigen mit höherem Kohlenstoffgehalt (Stahl), bei denen wohl Proportionalität und Formänderungsgrenze vorhanden, die Übergänge von einer zur anderen aber so allmählich verlaufen, daß eigentliche „Grenzen" nicht mit Sicherheit beim Versuch ermittelt werden können (s. S. 18).

2. Der Druckversuch.

a) Begriffsfeststellungen.

Ordnet man die Übertragung der vom Krafterzeuger der Prüfungsmaschine ausgeübten Kräfte auf den Probekörper so an, daß die Kräfte P (s. Fig. 22) in der Pfeil-

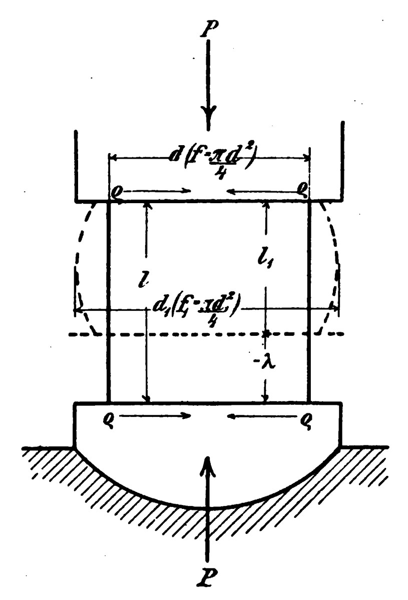


Fig. 22.
Druckbeanspruchung.

richtung, also gegeneinander wirken, so erfährt der Probekörper eine Druckbeanspruchung. Wie beim Zugversuch, kann man auch hier annehmen, daß sich die Gesamtkraft P auf den Querschnitt f des Druckkörpers

gleichmäßig verteilt, so daß der auf die Querschnittseinheit entfallende Belastungsanteil, die **Druckspannung**, sich aus der nachstehenden Gleichung errechnet:

$$-\sigma = -\frac{P}{f} \text{ kg/qcm oder Atm.}$$

Es ist gebräuchlich, die Zeichen für Spannung, Kraft, Formänderung, sobald es sich um Angaben über Druckversuche handelt, mit negativem Vorzeichen zu versehen.

Unterwirft man den Versuchskörper einer Druckbeanspruchung, so erfährt er wie beim Zugversuch eine Formänderung, indessen äußert sie sich in diesem Falle in einer **Zusammendrückung**, also einer **Höhenverminderung** und einer **Querschnittsvergrößerung**. Die Verkürzung, die der Körper erfährt, ist $-\lambda = l - l_1$, mithin die Verkürzung der Längeneinheit

$$-\varepsilon = \frac{-\lambda}{l} = \frac{l - l_1}{l};$$

oder in Prozenten der ursprünglichen Länge

$$-\delta = -\varepsilon\, 100 = \frac{-\lambda}{l} \cdot 100 = 100\left(1 - \frac{l_1}{l}\right).$$

Ebenso errechnen sich wie beim Zugversuch

$$\alpha = \frac{-\varepsilon}{-\sigma}$$

und der Elastizitätsmodul

$$E = \frac{1}{\alpha} = \frac{-\sigma}{-\varepsilon}.$$

Für die Querschnittsvergrößerung ergibt sich, ausgedrückt in Prozenten des ursprünglichen Querschnittes:

$$-q = \left(\frac{f_1}{f} - 1\right) 100 .$$

Die Querschnittsvergrößerung pflegt nicht über die ganze Länge des Probekörpers gleichmäßig zu verlaufen. In der Nähe der Endflächen, die sich gegen die Druckstücke der Prüfungsmaschine legen, ist sie geringer als in der Mitte des Körpers; sie wächst von beiden Endflächen nach der Mitte des Körpers zu, weshalb der Probekörper, besonders wenn es sich um ausgeprägt formänderungsfähige Materialien handelt, Tonnenform annimmt, wie punktiert in Fig. 22 angedeutet. Diese Erscheinung wird der Reibung zwischen Endflächen und Druckplatten der Maschine, die die Querschnittsvergrößerung behindert (Kräfte ϱ, s. Fig. 22), zugeschrieben.

b) Verlauf des Druckversuchs.

Materialien, die beim Zugversuch Proportionalität zwischen Belastung und Dehnung zeigen, pflegen auch beim Druckversuch proportionale Längenänderungen zu ergeben, wobei indessen wiederum nur bis zu einer bestimmten Spannungsgrenze, der Proportionalitätsgrenze $-\sigma_P$, für gleiche Spannungssteigerungen gleiche Verkürzungen erfolgen; oberhalb $-\sigma_P$ wachsen die Verkürzungen schneller als die Spannungen, bis schließlich analog den Vorgängen an der Fließgrenze beim Zugversuch (s. S. 49) auch hier „Fließen" eintritt. Die Spannungsgrenze, bei der diese Erscheinung auftritt, pflegt man Quetschgrenze ($-\sigma_S$) zu nennen. Den Verlauf eines Druckversuches mit einem Material, das P- und S-grenze zeigt, veranschaulicht Fig. 23. Die Schaulinien für den Druckversuch trägt man zum Unterschiede von denjenigen des Zugversuches zweckmäßig im vierten Quadranten auf.

Körper mit großer Formänderungsfähigkeit pflegen auch beim Druckversuch nach Überschreiten der Quetschgrenze ihr Oberflächenaussehen zu verändern. Beim Flußeisen z. B. wird die blanke Oberfläche krispelig; andere Materialien, wie Blei und Legierungen, die für gewöhnlich nicht homogene Gemenge darstellen, werden

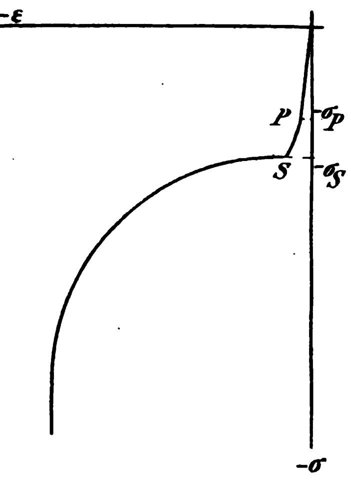


Fig. 23.
Verlauf des Druckversuches (Flußeisen).

an der Oberfläche runzelig, eine Erscheinung, die sich damit erklärt, daß die weicheren Materialteile der Legierung, die formänderungsfähiger als die harten sind, an der Oberfläche herausgedrängt werden, während die härteren dagegen zurückbleiben.

Wie der weitere Verlauf der Schaulinie in Fig. 23 zeigt, verläuft der Linienzug oberhalb der Quetschgrenze mehr und mehr asymptotisch zur Ordinatenachse, die

Längenänderungen des Körpers werden also für gleiche Belastungsstufen immer kleinere. Das ist damit zu erklären, daß der Querschnitt des Probekörpers mit zunehmender Formänderung mehr und mehr vergrößert wird, die tatsächliche Belastung der Querschnittseinheit also immer weniger gesteigert wird, wenn auch die Gesamtbelastung in gleichmäßig wachsenden Stufen zunimmt.

Es ist deswegen beim Druckversuch auch unmöglich, bei weichen Materialien die Bruchfestigkeit zu ermitteln. Man begnügt sich allgemein mit der Feststellung der Quetschgrenze. Auch die Verkürzungen des Probekörpers während des Versuches werden seltener gemessen; hier und da ermittelt man, besonders wenn es sich um vergleichende Versuche handelt, die Gesamtlängenänderung nach Belastungen von bestimmter Größe.

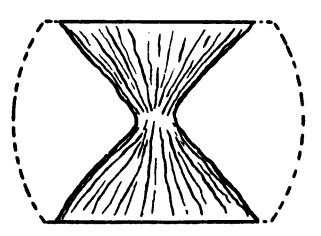


Fig. 24.
Brucherscheinung beim Druckversuch.

Anders als in Fig. 23 verläuft die Kurve für den Druckversuch, wenn man harte Körper (Gußeisen, Stahl, Gesteine usw.) prüft. Sie pflegen in der Regel ohne nennenswerte Formänderung zum Bruch zu kommen, wobei gewöhnlich Quetschgrenze und Bruchgrenze ($-\sigma_B$) nahezu zusammenfallen.

Interessant sind die Brucherscheinungen beim Druckversuch; es prägen sich in der Regel Druckkegel oder bei würfelförmigen Körpern Druckpyramiden nach Fig. 24 aus, während der umgebende Mantelring zerstört wird. Martens erklärt die Erscheinung in seinem Handbuch

5*

damit, daß das infolge der Reibung zwischen den Druckflächen an der Querausdehnung verhinderte Material über den Druckflächen sich staut und, indem es Druckkegel bildet, den Mantelring zersprengt. Nicht selten ist auch eine Brucherscheinung nach Fig. 25, bei der die Bruchlinie unter 45° verläuft. Holzkörper pflegen fast regelmäßig in dieser Form zu Bruch zu gehen, indem die einzelnen Fasern längs der Bruchlinie umknicken und die beiden Bruchstücke sich gegeneinander abschieben.



Fig. 25.
Brucherscheinung beim Druckversuch.

c) Einspannung beim Druckversuch.

Die Einspannung des Probekörpers in die Prüfungsmaschine ist beim Druckversuch schwieriger als beim Zugversuch, weil infolge nicht zentrischer Einspannung leicht exzentrische Druckbeanspruchungen eintreten können. Die Einspannköpfe der Prüfungsmaschinen sind für Druckversuche meist so eingerichtet, daß eine der Druckplatten, gegen die sich der Probekörper mit seinen Endflächen anlegt, fest, wohingegen die andere im Kugellager beweglich gelagert ist (s. Fig. 22). Man erreicht dadurch gleichmäßige Druckverteilung über den ganzen Querschnitt der Probe, auch wenn die beiden Endflächen des Probekörpers nicht genau parallel zueinander gearbeitet sind, vorausgesetzt, daß sie wenigstens nahezu eben sind. Bisher hatte

man für gewöhnlich die untere Druckplatte mit Kugellager versehen. Rudeloff (Dinglers Journal 1905, S. 401) hält indessen die Anbringung des Kugellagers an der oberen Druckplatte für zweckmäßiger. Um die genaue Einstellung der Probekörper in die Druckachse der Maschine zu erleichtern, sind auf die Druckplatten konzentrische Kreise um den Druckmittelpunkt oder entsprechende Vierecke aufgetragen.

d) Probenform.

Die Probenform hat auch beim Druckversuch erheblichen Einfluß auf die Versuchsergebnisse, weswegen auch hier dem Ähnlichkeitsgesetz Rechnung zu tragen ist. Der Normaldruckkörper ist ein Zylinder, dessen Höhe gleich dem Durchmesser ist, oder der Würfel, also ein Körper, bei dem der Quotient $\frac{1}{n} = \frac{\sqrt{f}}{l}$ nahezu 1 ist. Bei diesem Verhältnis wird $-\varepsilon$ nachweislich am wenigsten beeinflußt und reine Druckwirkung erzielt, wohingegen Knickbeanspruchungen zu den reinen Druckbeanspruchungen hinzutreten, wenn $\frac{1}{n} < 1$ gemacht wird; die Höhe des Körpers wird in diesem Falle gegenüber dem Querschnitt zu groß und der Körper knickt aus.

Eingehende Behandlung findet die Frage des Einflusses der Probenform auf die Versuchsergebnisse beim Druckversuch in den Veröffentlichungen von Martens, in seinem Handbuch der Materialienkunde S. 109 ff. und in den „Mitteilungen aus den technischen Versuchsanstalten“ 1896, S. 133.

Es erübrigt, noch zu bemerken, daß man zweckmäßig die Probenform, besonders die Größe der Querschnittsfläche, so bemißt, daß die Leistungen der gebräuchlichen Prüfungsmaschinen ausreichen, um Quetsch-

bzw. Bruchgrenze zu erreichen. Für Metalle usw. kommen meist Zylinder von 2—3 cm Durchmesser oder Würfel mit Kantenlänge von 2—3 cm, für Bindemittel (Zement usw.) Würfel mit 7,1 cm Kantenlänge zur Anwendung.

3. Knickversuch.

Wird beim Druckversuch, wie auf Seite 69 bemerkt, der Quotient $\frac{1}{n}$ erheblich kleiner als 1 gemacht und somit die Höhe oder Länge des Versuchskörpers im Verhältnis zu seiner Querschnittsfläche sehr groß, so treten nicht mehr reine Druckbeanspruchungen und deren Folgeerscheinungen im Probekörper ein; der Körper nimmt nicht die in Fig. 22 dargestellte Tonnenform an, sondern knickt nach einer Seite aus. Dieser Knickversuch findet als Materialprüfung nur selten Anwendung. Wo er ausgeführt wird, handelt es sich meistens um Belastungsproben mit Säulen und Stützen oder anderen ähnlichen Konstruktionsteilen.

Man kann hinsichtlich der Einspannung der Probenenden für den Knickversuch vier Arten unterscheiden, die die Fig. 26 bis 29 erläutern. Bei den Belastungsfällen nach Fig. 26 und 27 sind die Probenenden auf der einen Seite fest eingespannt, auf der anderen hingegen beweglich gelagert, während bei den anderen Fällen entweder beide Enden beweglich (Fig. 28) oder beide Enden fest eingespannt sind (Fig. 29). Beim Belastungsfall nach Fig. 26 ist im Gegensatz zu den übrigen Fällen das Probenende, an dem die parallel zur Stabachse wirkende Kraft P angreift, nicht geführt, so daß dieses Ende frei nach der Seite ausweichen kann.

Für diese vier Belastungsarten hat Euler seine bekannten Formeln zur Errechnung der Grenzbelastungen aufgestellt. Sie lauten für

Fall nach Fig. 26 $P = \frac{\pi^2}{4} \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{J}{l^2}$,

„ „ „ 27 $P = 2\pi^2 \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{J}{l^2}$,

„ „ „ 28 $P = \pi^2 \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{J}{l^2}$,

„ „ „ 29 $P = 4\pi^2 \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{J}{l^2}$,

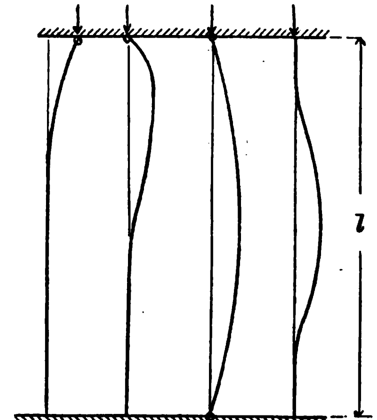


Fig. 26. 27. 28. 29.
Vier Knickbeanspruchungen nach Euler.

worin J das in Frage kommende Trägheitsmoment, l die Länge der Probe zwischen den Einspannungen bedeutet.

Für die Versuche, wie sie mit Prüfungsmaschinen ausgeführt werden, kommt gewöhnlich der Belastungsfall

nach Fig. 28 in Frage. Die Einspannung der Probenenden verursacht oft erhebliche versuchstechnische Schwierigkeiten; man sucht möglichst zentrische Druckübertragung dadurch zu erzielen, daß man die Druckplatten, gegen die sich die Probenenden stützen, in Kugellagern lagert, oder man benutzt besondere Druckstücke mit Spitzen, Schneiden oder Kugeln zur Druckübertragung. — Die Kraftwirkung beim Knickversuch äußert sich dahin, daß der Körper nicht wie bei Aufnahme reiner Druckbeanspruchung tonnenförmige Gestalt annnimmt, sondern nach oben, unten, links oder rechts ausbiegt, mithin eine ähnliche Beanspruchung wie beim Biegeversuch erfährt. Das Ausbiegen erfolgt entweder allmählich (bei weicherem, stark formänderungsfähigem Material) oder plötzlich (bei härterem Material). Man pflegt neben den ausgeübten Belastungen die Durchbiegungen nach den vier in Frage kommenden Richtungen zu messen und zwar an drei in einer Linie liegenden Punkten: je ein Meßpunkt in der Nähe der beiden Probenenden, der dritte in der Mitte der Probe; Bauschinger hat für diesen Zweck geeignete Meßapparate konstruiert, die auf Seite 151 beschrieben sind.

Die mannigfachen, ganz unkontrollierbaren Einflüsse, die sich während des Versuches geltend machen, sei es, daß sie von den Einspannungen oder den Druckübertragungsstücken ausgehen, sei es, daß sie durch besondere Eigentümlichkeiten des Probekörpers, wie nicht homogenes Material oder windschiefe Form der Probe usw., veranlaßt werden, bewirken meistens, daß die Ergebnisse der Formänderungsmessung keine Regelmäßigkeit oder Gesetzmäßigkeit zeigen, so daß Formänderungsgrenzen, wie die Proportionalitätsgrenze, sich nicht in den Meßergebnissen auszuprägen pflegen. Der Knickversuch pflegt daher als vergleichende Materialprobe nur selten Interesse

zu haben, und wo dies gelegentlich der Fall ist, kann meistens nur die ermittelte Höchstlast, d. h. diejenige Belastung, bei der der Probekörper zum Ausknicken oder zum Bruch kam, zur Materialbeurteilung herangezogen werden. Wertvolle Unterlagen für die Ermittlung der Tragfähigkeit und der Spannungsverteilung bietet indessen dem Konstrukteur der Knickversuch an ganzen Konstruktionsteilen, wobei man die Versuchsbedingungen tunlichst den für die wirkliche Belastung im Bauwerk in Frage kommenden Verhältnissen anpaßt.

4. Biegeversuch.

Beim Biegeversuch können die Kraftwirkungen entweder nach Fig. 30 oder nach Fig. 31 erfolgen. Die letztere Wirkungsart ist bei der Materialprüfung die gebräuchlichere; die Probe ist dabei an den Enden auf Stützpunkten gelagert und die Kraft greift in der Mitte der Probe an. Die Konstruktionsteile der Prüfungsmaschinen, die als Stützpunkte beim Biegeversuch dienen, pflegen in der Regel drehbar, als Rollen oder dgl. ausgebildet zu sein, damit die Reibung des Probekörpers an den Auflagestellen vermindert wird.

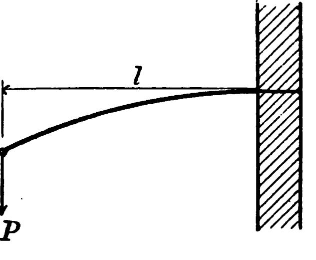
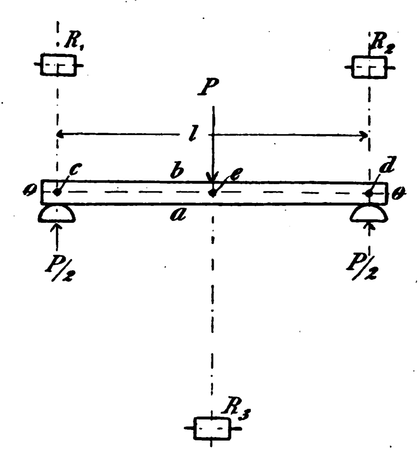


Fig. 30.
Biegungsbeanspruchung (einseitig eingespannter Stab).

Der Biegeversuch als reine Materialprobe findet im Materialprüfungswesen nur selten Verwendung. Gußeisen, Holz, Eisenbahnschienen und Beton pflegt man nach dem Ausfall des Biegeversuches zu beurteilen; vielfach werden

aber Biegeversuche als Belastungsproben mit fertigen Konstruktionen, wie Brücken, Decken usw., ausgeführt. Für den Biegeversuch als Materialprobe gibt man dem Versuchskörper möglichst einfache Querschnittsform, deren Trägheitsmoment leicht zu errechnen ist.



R_1 R_2 R_3 = Rollenapparate (Bauschinger).
o—o = Neutrale Faser.
a = Zugseite. b = Druckseite.
c d e = Meßpunkte.
l = Stützweite.

Fig. 31.
Biegungsbeanspruchung
(Stab an beiden Enden unterstüzt, Einzellast in der Mitte).

Gemessen werden die vom Versuchskörper getragenen Belastungen, bezogen auf die Querschnittseinheit, und die dabei erzielten Durchbiegungen der sogenannten neutralen Faser. Man bezeichnet damit die Schwerpunktsachse s Körpers, die beim Biegeversuch die Spannung O er-

fährt. Die Längsfasern eines stabförmigen Probekörpers, der nach Fig. 31 gebogen wird, erfahren auf der mit *a* bezeichneten Seite Zugspannungen, auf der mit *b* bezeichneten hingegen Druckspannungen, die an den Außenseiten am größten sind und nach der Mittelachse des Körpers zu kleiner, in der Mittel- oder Schwerpunktsachse des Körpers, der neutralen Faser, aber *O* werden. Die Spannungen wachsen also proportional dem Abstande der Flächenelemente von der neutralen Achse.

Um die Durchbiegung der neutralen Achse des Probestabes einwandfrei zu messen, ist es erforderlich, daß die örtlichen Verdrückungen des Materials und Bewegungen des Probestabes über den Auflagerstellen berücksichtigt werden. Es finden deshalb gewöhnlich drei Meßapparate Verwendung, von denen je einer die Bewegungen der in der neutralen Achse des Stabes markierten Punkte *c* und *d* (s. Fig. 31) über den beiden Auflagern, der dritte diejenigen eines in der Mitte der Stablänge ebenfalls in der neutralen Achse markierten Punktes e mißt. Die wirkliche Durchbiegung der neutralen Faser errechnet sich dann zu $e - \frac{c + d}{2}$. Als Meßapparate finden häufige Verwendung die Rollenapparate nach Bauschinger oder sogenannte Tellerapparate. Beide sind S. 150 beschrieben.

Bei weichen, stark formänderungsfähigen Materialien pflegt der Verlauf des Biegeversuches analog demjenigen des Zugversuches zu sein. Man findet genau wie dort eine Proportionalitätsgrenze σ_P und eine Fließgrenze σ_S, die man Biegegrenze nennt. Mit dem Erreichen der Biegegrenze wird bei weichen Materialien der Versuch in der Regel abgebrochen, da Biegegrenze und Bruchgrenze, d. h. die höchste vom Stabe getragene Belastung, zusammenfallen. In vielen Fällen wird indessen der Probe-

stab überhaupt nicht zum Bruch gebracht werden können, weil einerseits gewöhnlich die Maschineneinrichtungen die Durchbiegung nur bis zu bestimmtem Maße gestatten und andererseits Stäbe aus weichen Materialien sich so weit werden durchbiegen lassen, daß die beiden Schenkel um 180° gebogen werden, die Probenenden also zur Auflage aufeinander kommen, ohne daß Bruch der Probe eintritt. — Harte, wenig formänderungsfähige Materialien pflegen gegen Biegung sehr empfindlich zu sein und kommen daher ohne nennenswerte Durchbiegung zum Bruch.

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse der Biegeversuche kommen die nachstehenden Gleichungen in Frage:

Die Spannungen, d. h. die Belastungen auf die Querschnittseinheit, sind

$$\sigma = \frac{P \cdot l}{4\,W},$$

worin P die Gesamtbelastung, l die Länge der Probe zwischen den Auflagerpunkten, W das Widerstandsmoment der Probe bedeuten. Gelegentlich bietet die Errechnung der Spannungen getrennt für die äußersten auf Zug oder Druck beanspruchten Fasern Interesse; dann ist zu setzen:

$$\sigma = \frac{P\,l \cdot e}{4\,W},$$

worin e den Abstand der äußersten Fasern von der neutralen Faser bedeutet.

Für die Angabe der Durchbiegungen δ_b empfiehlt Martens in seinem Handbuch den Wert Biegungsgröße, die den Biegungspfeil für die Spannungseinheit

angibt, wobei **Biegungspfeil** den Quotienten δ_b/l, d. h. die Durchbiegung für die Längeneinheit der Stützweite, bedeutet. Biegungsgröße ist also:

$$\frac{\delta_b/l}{\sigma}.$$

Es ist ferner:

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\sigma} = 48\frac{J}{l^3}\cdot\frac{\delta_b}{P},$$

worin J das Trägheitsmoment bedeutet, und

$$E = \frac{1}{\alpha}.$$

Mit der Einführung des Biegungspfeiles δ_b/l sucht **Martens** wiederum dem Ähnlichkeitsgesetz Rechnung zu tragen, insofern als gleiche Spannungen in geometrisch ähnlichen Körpern gleiche Biegungspfeile erzeugen. Geometrisch ähnliche Probenkörper vorausgesetzt, wird man graphische Auftragungen des Versuchsergebnisses zweckmäßig nach σ als Ordinaten und δ_b/l (Biegungspfeil) als Abszissen vornehmen, um direkt vergleichbare Ergebnisse vor sich zu haben. Indessen haben diese Umstände praktisch beim Biegeversuch weniger Bedeutung als bei den vorher beschriebenen Versuchsarten, weil, wie schon bemerkt, Materialien, mit denen Biegeversuche als Materialprobe ausgeführt werden, meist nicht nennenswerte Durchbiegungen (Holz ausgenommen) erfahren.

5. Torsionsversuch.

Bei weitem seltener als der Biegeversuch findet der Torsionsversuch zur Bestimmung der Drehfestigkeit des Materials im Materialprüfungswesen Anwendung, wenngleich die bei seiner Durchführung erzielten Ergebnisse,

insbesondere auch für die Formänderungen, große Regelmäßigkeit zeigen und Schlüsse auf Vorhandensein bestimmter Formänderungsgrenzen zulassen. Der Kraftangriff erfolgt beim Torsionsversuch durch ein Kräftepaar, das senkrecht zur Längsachse des Versuchsstückes wirkt und bestrebt ist, den Versuchskörper um seine Längsachse zu verwinden. Im großen wird der Versuch meist mit Wellen, Achsen und sonstigen im Betriebe auf Verdrehen beanspruchten Maschinenteilen ausgeführt; im kleinen findet er ausgiebigste Verwendung als sogenannte technologische Materialprobe bei der Beurteilung von Drähten, die zur Seilfertigung Verwendung finden. Die Versuchsanordnung wird gewöhnlich so getroffen, daß das eine Probenende in entsprechend geformter Einspannvorrichtung festgelegt wird, die von der Antriebsvorrichtung der Maschine her in drehende Bewegung versetzt werden kann. Am anderen Ende des Versuchskörpers, das gleichfalls in einer Einspannmuffe befestigt ist, wird die auf Verdrehung wirkende Kraft auf die Meßvorrichtung der Maschine, meist eine Hebelwage oder hydraulische Meßdose, übertragen und findet hier eine Gegenkraft. Unter dem Einfluß dieser Kraft, deren Größe durch die Gewichte bestimmt wird, die man an der Wagevorrichtung der Maschine zur Wirkung bringen muß (oder durch den Wasserdruck in der Meßdose), um Gleichgewicht herzustellen, wird der Probekörper eine elastische oder bleibende Verdrehung erfahren. Gemessen werden diese Formänderungen meist mit Feinmeßinstrumenten als Differenz der Verdrehung zweier in bestimmtem Abstand voneinander liegender Querschnitte.

Eine einfache, aber überaus empfindliche Meßvorrichtung sei gleich an dieser Stelle kurz beschrieben. An den zur Messung benutzten beiden Querschnitten wird

je ein plangeschliffener Spiegel, wie sie bei den Martensschen Spiegelapparaten (s. S. 143) Verwendung finden, am Versuchskörper so befestigt, daß der Spiegel sowohl um seine Horizontal- als auch Vertikalachse gedreht werden kann. In bestimmter Entfernung vom Spiegel, deren Größe man je nach den in Frage kommenden Verhältnissen wählen muß, ist an einem Fernrohr eine Skala mit Millimeterteilung angebracht. Mit Hilfe des Fernrohres mißt man die Verschiebungen des Spiegelbildes der Skala gegen ein Fadenkreuz im Fernrohr, nachdem man zuvor durch Ausrichten des Fernrohres das Fadenkreuz auf die Spiegelmitte eingestellt und das Spiegelbild der Skala durch entsprechendes Kippen des Spiegels in das Gesichtsfeld des Fernrohres gebracht hat. Die beobachtete Verschiebung des Skalenbildes gibt ein Maß für die Verdrehung des Stabquerschnittes, an dem der Spiegel befestigt ist, weil letzterer der Drehbewegung folgt. Die Vergrößerung, in der diese Verdrehuug gemessen wird, ist hierbei abhängig von der Entfernung der Skala vom Spiegel.

Die Formänderungsmessung ergibt für Materialien, die auch beim Zugversuch Proportionalität zeigen, und solche werden ja in den weitaus meisten Fällen für den Drehversuch im großen in Frage kommen, auch für den Drehversuch ausgesprochene Proportionalität und meistens auch scharf ausgeprägte Proportionalitätsgrenze (σ_P). Oberhalb der Proportionalitätsgrenze nehmen die Formänderungen gegenüber den Belastungen rasch zu, bis schließlich Fließen eintritt und die sogenannte Verdrehungsgrenze (σ_S) erreicht ist, womit man den Versuch abzubrechen pflegt. Aus der Richtung, in der die Ablesungen an den vorher beschriebenen Feinmeßapparaten beim Eintritt des Fließens vorgehen, kann man

Schlüsse über die Lage der zum Fließen kommenden Probenteile ziehen. Gehen beide Ablesungen während des Fließens wie beim bisherigen Verlauf des Versuchs vor, so müssen die besonders im Fließen begriffenen Querschnitte außerhalb der durch die beiden Spiegel abgegrenzten Probenlänge und zwar nahe der Einspannung der Probe an der Wagenseite der Maschine liegen; gehen beide Ablesungen zurück, so fließt der Versuchskörper ebenfalls außerhalb der Meßlänge, jedoch in der Nähe der Antriebsseite der Maschine. Geht eine Spiegelablesung vor, die andere hingegen zurück, so fließt das Material innerhalb der Meßlänge.

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse kommen bei Versuchskörpern mit kreisrundem Querschnitt die nachstehenden Beziehungen in Frage:

$$\sigma_P = \frac{Pr_P}{W_p} \text{ kg/qcm},$$

$$\sigma_S = \frac{Pr_S}{W_p} \text{ kg/qcm},$$

worin Pr das Drehmoment an der P- bzw. S-Grenze in cmkg, W_p das polare Widerstandsmoment $\left(\frac{\pi d^3}{16}\right)$ bedeuten.

Der sogenannte Gleitmodul G, der nach Bach 0,385 des Elastizitätsmoduls beträgt, errechnet sich aus:

$$G = \frac{\Delta Pr \cdot l}{\varphi \cdot J_p},$$

worin bedeutet: ΔPr die Steigerung des Drehmomentes in cmkg, l die Entfernung der zur Verdrehungsmessung benutzten Querschnitte voneinander, J_p das polare Trägheitsmoment $\left(\frac{\pi d^4}{32}\right)$, φ den Verdrehungswinkel.

Der Verdrehungswinkel $\varphi = \frac{\Delta \lambda}{A \cdot 200}$, wenn $\Delta \lambda$ der mittlere Verdrehungszuwachs für die Steigerung des Drehmomentes um ΔPr und A der Abstand der Spiegel von den Skalen ist; die Zahl 200 im Nenner ist hinzugefügt, weil die Ablesung an den Skalen mit Millimeterteilung nach $\frac{1}{100}$ cm erfolgt und wegen der Spiegelwirkung mit der doppelten Entfernung von A zu rechnen ist. Es ist mithin

$$G = \frac{\Delta Pr \cdot l \cdot A \cdot 200}{J_p \cdot \Delta \lambda}.$$

Den reziproken Wert $\frac{1}{G} = \beta$ nennt man Schubzahl entsprechend der Drehungszahl α.

6. Scher- und Lochversuche.

a) Scherversuch.

Bei weitem ausgiebigere Anwendung als die eben beschriebenen Versuchsarten findet im Materialprüfungswesen der Scherversuch, bei dem es sich um Feststellung des Widerstandes handelt, den ein Körper dem Verschieben zweier ebener Querschnitte gegeneinander entgegensetzt.

Es hat nicht an Vorschlägen gefehlt, den verhältnismäßig einfach auszuführenden Scherversuch an die Stelle des weitaus umständlicheren Zerreißversuches treten zu lassen; indessen haben diese Vorschläge noch nicht den erwarteten Anklang gefunden. Kick empfiehlt den Scherversuch zur Bestimmung der Härte der Materialien, da er Härte identisch mit Scherfestigkeit erklärt.

Die Beanspruchung des Probekörpers beim Scherversuch kann entweder einschnittig oder zwei-

schnittig sein, je nachdem ein Querschnitt nach Fig. 32 oder deren zwei nach Fig. 33 auf Abscheren beansprucht

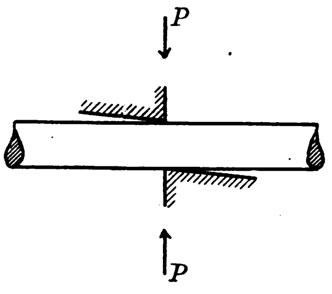


Fig. 32.
Einschnittige Scherbeanspruchung.

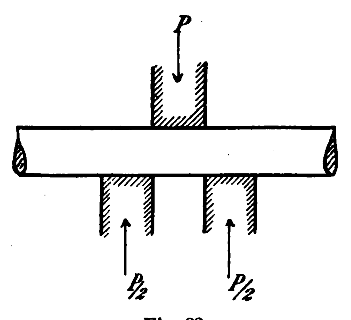


Fig. 33.
Zweischnittige Scherbeanspruchung.

werden; die letztere Versuchsart dürfte die gebräuchlichere sein.

Einen zweckmäßigen Apparat für die Ausführung zweischnittiger Scherversuche hat Martens konstruiert

und in seiner Materialienkunde S. 154 dargestellt. Er ist in Fig. 34 wiedergegeben und besteht aus dem zweiteiligen gußeisernen Gehäuse *a*, in dem drei kreisrunde Scherbacken *b*, *c*, *d* nebeneinander gelagert sind. Die beiden äußeren Backen liegen fest, während die mittlere zwischen ihnen in einem beweglichen Schieber *e* gehalten

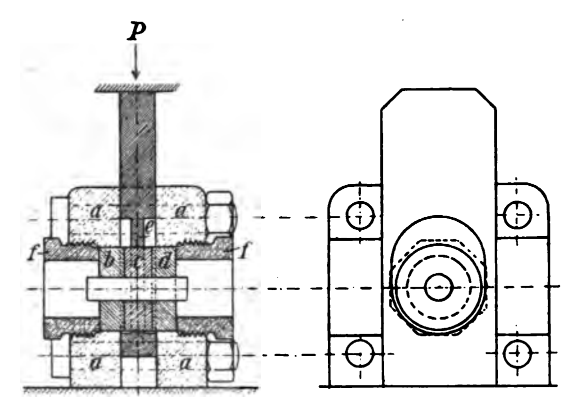


Fig. 34.
Scherapparat nach Martens („Materialienkunde", S. 154).

ist, auf dessen oberer, aus dem Gehäuse herausragender Druckfläche die scherende Kraft *P* wirkt. Die Scherbacken haben in ihrem Mittelpunkte Bohrungen, deren Durchmesser dem Durchmesser der zu scherenden Probe entspricht. Für den Versuch wird die Scherprobe in die Bohrungen der drei Scherbacken eingeführt und das gußeiserne Gehäuse durch die seitlich angebrachten Verschlußmuttern *f* geschlossen. Mit Hilfe der Verschlußmuttern können gleichzeitig die beiden seitlichen Scher-

backen so verschoben werden, daß Schieber *e* und die mittlere Backe gerade leicht beweglich zwischen ihnen gleiten können. Der ganze Apparat wird als Druckkörper in eine Prüfungsmaschine eingebaut. Die Belastung der Probe erfolgt durch den Krafterzeuger der Maschine in der Pfeilrichtung (s. Fig. 34). Die zum Abscheren der Probe benötigte Kraft wird mit dem Kraftmesser der Prüfungsmaschine bestimmt. Die Scherspannung errechnet sich bei der zweischnittigen Beanspruchung aus dem Quotienten $\frac{P}{2f}$, worin f die Querschnittsfläche bedeutet.

Die durch diese Versuchsart ermittelte Festigkeit ist indessen nicht als reine Scherfestigkeit anzusehen. Abgesehen von der örtlichen Verdrückung, die der Probekörper an der Auflage- und Druckstelle der mittleren Scherbacke erfährt, treten, sobald das Material Formänderungen erleidet, Biegungsbeanspruchungen hinzu, da die zylindrischen Scherproben naturgemäß nicht ohne geringes Spiel in den Bohrungen der Scherbacken hergestellt werden können und Durchbiegung in der Kraftrichtung daher möglich wird.

In bezug auf die Probenform ist noch zu bemerken, daß man zylindrische Probekörper verwendet, deren Länge etwas größer als die dreifache Scherbackendicke gemacht wird. Die Scherbackendicke wird zweckmäßig gleich dem Durchmesser der Probe gemacht, so daß die beiden auf Scheren beanspruchten Querschnitte in einem Abstande, der gleich dem Durchmesser der Probe ist, voneinander entfernt liegen. — Zwischen Zug- und Scherfestigkeit sind für einzelne Materialien bestimmte Beziehungen nachgewiesen. Für Flußeisen ist die Scherfestigkeit gleich 0,7—0,8 der Zugfestigkeit, für Gußeisen sind beide Festigkeiten nahezu gleich.

b) Lochversuch.

Beim Lochversuch kommt gleichfalls die Scherfestigkeit in Frage, indessen ist die Art der Beanspruchung der Probe eine andere als beim eigentlichen Scherversuch. Mit Hilfe eines geführten Stahlstempels wird aus der Probe (gewöhnlich Blechstreifen), die auf eine mit Bohrung versehene Unterlagsplatte gelegt wird, ein Zylinder herausgeschert. Die Schnittfläche ist also keine ebene, wie beim Scherversuch, sondern eine zylindrische. — Der Lochversuch findet als Materialprobe nur selten Anwendung.

Martens hat auch für diese Versuchsart einen Prüfungsapparat seiner Bauart in seiner „Materialienkunde" S. 161 angegeben, der in Fig. 35 dargestellt ist. Im unteren Gußstück *A* werden die stählernen Matrizen *B* eingebaut, im oberen Gußstück *E* ist der gleichfalls aus Stahl hergestellte Stempel *D* geführt, in dessen unterem Ende die eigentlichen Lochstempel *C* eingepaßt sind. Durch die seitlich angeordneten Bolzen werden oberes und unteres Gußstück in bestimmter Lage zu-

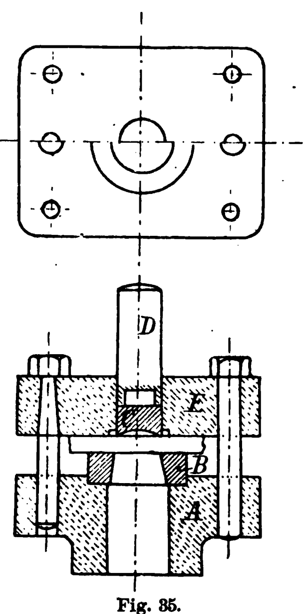


Fig. 35.
Lochapparat nach Martens („Materialienkunde" S. 161).

einander gehalten. Der ganze Apparat wird wie der Scherapparat in die Prüfungsmaschine als Druckkörper eingebaut, der Stempel D durch den Krafterzeuger der Maschine belastet und die zum Durchscheren der Probe erforderliche Belastung am Kraftmesser der Maschine abgelesen. Die Lochstempel haben entweder ebene oder ausgehöhlte Endfläche. Bei ausgehöhlter Endfläche pflegen die Lochfestigkeiten geringer auszufallen als bei ebener Endfläche. Einige Vergleichszahlen, die von Martens mit Messingblech von 4 mm Dicke erhalten wurden, sind nachstehend wiedergegeben:

a) bei ebenem Stempel:	2830	2770	2570
b) bei ausgehöhltem Stempel:	2590	2510	2360
Verhältniszahlen für b); wenn Zahlen für $a = 100$ gesetzt:	92	91	92

Die Lochfestigkeit τ des Materials errechnet sich aus der Gleichung

$$\tau = \frac{P}{f},$$

worin P die zum Durchscheren erforderliche Kraft bedeutet und f zu setzen ist $= \pi \cdot d \cdot l$, (d der Stempeldurchmesser und l die Probendicke).

B. Festigkeitsversuche mit stoßweiser Belastung (Schlagversuch).

a) Begriffsfeststellung und Versuchsausführung.

Bei den bisher beschriebenen Versuchsarten wurde die Belastung langsam und stetig gesteigert, beim Schlagversuch jedoch findet plötzliche, stoßweiße Beanspruchung des Materials statt; die Belastung wird augenblicklich bis auf die beabsichtigte Höhe gesteigert,

dementsprechend muß das Material auch augenblicklich seine Formänderung vollziehen. Es leuchtet ein, daß die Materialien hierbei wesentlich anderes Verhalten zeigen werden als bei der sogenannten statischen Belastung, d. h. der langsam gesteigerten. Tatsächlich ist es kein seltenes Vorkommnis, daß Materialien, die beim Zugversuch ausgeprägtes Formänderungsvermögen zeigten, sich beim Schlagversuche als außerordentlich spröde erweisen und ohne wesentliche Formänderung zum Bruch kommen. Es sind jedoch bisher gesetzmäßige Beziehungen zwischen Zug- und Schlagfestigkeit bei den einzelnen Materialien noch nicht festgestellt worden. Beide Versuchsarten sind schon deshalb schwer miteinander vergleichbar, weil beim Schlagversuch die wirklich vom Versuchskörper aufgenommene Schlagarbeit nicht leicht zu messen ist, da sie teilweise von den Versuchseinrichtungen (Schabotte usw.) aufgenommen wird.

Der Schlagversuch hat im Materialprüfungswesen große Verbreitung gefunden, sowohl als Materialprobe, wobei zylindrische oder würfelförmige Probekörper Verwendung finden, als auch zur Prüfung ganzer Konstruktionsteile, besonders von Eisenbahnmaterialien, wie Schienen, Achsen, Radreifen usw. Die Versuchsausführung geschieht bei den einfachen Schlagproben in der Weise, daß der Probekörper auf einer Schabotte aufgestellt wird und hiernach durch einen Fallbären, ein eisernes Gewicht, das zwischen geeigneten Vorrichtungen geführt ist und das aus einer bestimmten Höhe zum Herabfallen gebracht wird, einen Schlag erhält.

Da Bauart und Abmessungen der Versuchseinrichtungen besonders beim Schlagversuch von erheblichem Einfluß auf die Versuchsergebnisse sind, so haben sich schon frühzeitig Bestrebungen geltend gemacht, den für Schlagver-

suche benützten Versuchseinrichtungen solche Formen zu geben, daß vergleichbare Versuchsergebnisse erzielt werden. Durch diese Bestrebungen sind die sogenannten Normalfallwerke entstanden, deren Einrichtungen später (S. 93) beschrieben sind.

b) Schlagarbeit und Formänderungsmessung.

Als Maß für die beim Schlagversuch zur Wirkung kommende Kraft wird die Schlagarbeit, d. h. das Produkt aus Bärgewicht und Fallhöhe, benutzt, und man beurteilt das Material nach der unter bestimmter Schlagarbeit erlittenen Formänderung. Die Schlagarbeit wird auf die Raumeinheit des Probekörpers bezogen und als sogenannte spezifische Schlagarbeit, die Höhenverminderung in Prozenten der ursprünglichen Höhe angegeben. Den übersichtlichsten Maßstab bietet immer die Schaulinie, die die erzielten Höhenverminderungen als Funktion der angewandten Schlagarbeiten darstellt. Die gegenseitigen Beziehungen der in Frage kommenden Größen lassen sich wie beim Zugversuch wie folgt ausdrücken:

Spezifische Schlagarbeit $a = \frac{A}{i}$, worin

$A = H \cdot G$ in cmkg (H = Fallhöhe, G = Bärgewicht),
i = Inhalt der Probe in ccm,
daher

$$a = \frac{H \cdot G}{i} \frac{\text{cmkg}}{\text{ccm}}.$$

Die Höhenverminderung ist

$$-\lambda = l - l_1,$$

daher die Stauchung: (vgl. Martens Materialienkunde S. 161)

$$-\varepsilon_S = \frac{-\lambda}{l} = \frac{l - l_1}{l}$$

oder in Prozenten

$$-\delta_S = \left(1 - \frac{l_1}{l}\right) \cdot 100\,.$$

Die Messung der Höhenverminderung wird sich immer nur auf die bleibenden Formänderungen beschränken, da die Messung der elastischen Formänderungen beim Schlagversuch Schwierigkeiten bereitet. Um einwandfreie Meßergebnisse für die Höhenverminderung zu erhalten, muß man den Probekörper, nachdem er den Schlag des Bären erhalten hat, vor weiteren sogenannten Prellschlägen schützen. Unter dem Einfluß der Elastizität des Probekörpers wird nämlich der Bär nach dem Aufschlagen auf die Probe noch mehrere Male in die Höhe springen und wieder zurück auf die Probe fallen. Man schützt den Probekörper zweckmäßig vor diesen weiteren Schlägen dadurch, daß man ihn vorher an einer Schnur befestigt und ihn nach dem ersten Schlage schnell unter dem Bären hervorzieht, was bei einiger Übung meistens gut gelingt.

Die zu wählende spezifische Schlagarbeit muß tunlichst dem in Frage kommenden Material angepaßt werden. Einheitliche Vereinbarungen über die für die einzelnen Materialien zu wählenden Schlagarbeiten sind bisher noch nicht getroffen worden. Martens (Materialienkunde S. 161) führt als Gütemaßstab den sogenannten Stauchfaktor ein, d. h. diejenige spezifische Schlagarbeit in cmkg/ccm, die aufgewendet werden muß, um einen Probekörper bestimmter Grundform (Kugel, Normalzylinder, Würfel) gerade zum Bruch oder auf $-\varepsilon_S = 0{,}80$ zu bringen. Zu seiner Ermittlung schlägt er Vorversuche vor, bei denen

von fünf Probekörpern einer mit 1 a (a = spez. Schlagarbeit), der zweite mit 2 a, der dritte mit 4 a beansprucht wird, wobei als spezifische Schlagarbeit empfohlen wird: für Eisen und festere Metalle a = 1000 cmkg/ccm, Kupfer, Bronzen, weiche Legierungen a = 500 cmkg/ccm, Gußeisen a = 250 cmkg/ccm, Weichmetalle (Blei usw.) a = 25 cmkg/ccm. Der vierte und fünfte Probekörper soll hiernach auf Grund der bei den Körpern 1—3 gemachten Erfahrungen mit einem Schlage zum Bruch oder auf $-\varepsilon_s = 0{,}80$ gebracht werden, so daß also mit einem Schlage der Stauchfaktor erreicht wird.

c) Beeinflussung der Versuchsergebnisse.

Eine Reihe von Einflüssen, die sich für den Ausfall der Versuchsergebnisse beim Schlagversuch geltend machen, sind Gegenstand eingehender Untersuchungen, besonders auch durch Martens und Kick, gewesen.

Zunächst sollte man annehmen, daß es nicht gleichgültig ist, wie das Produkt Schlagarbeit: Bärgewicht mal Fallhöhe, gebildet ist, ob aus den beiden Faktoren kleines Bärgewicht und große Fallhöhe oder großes Bärgewicht und kleine Fallhöhe. Wenn ein kleines Gewicht aus großer Höhe auf den Probekörper fällt, ist die Geschwindigkeit, mit der die Formänderung des Probekörpers vollzogen wird, zweifellos größer, als wenn ein großes Bärgewicht aus kleiner Fallhöhe fällt. Nach den Versuchen von Kick und Martens scheint jedoch die Geschwindigkeit, mit der die Formänderung vollzogen wird, keinen praktisch bemerkbaren Einfluß auf den Ausfall des Versuchsergebnisses zu haben.

Andere Versuche von Martens haben das interessante Ergebnis gezeitigt, daß die mit einer bestimmten Schlagarbeit erzielte Höhenverminderung erheblich größer aus-

fällt, wenn man die gesamte Schlagarbeit mit einem Schlage zur Wirkung bringt, als wenn man eine Reihe weniger wuchtiger Schläge ausübt, deren Summe von Schlagarbeiten nicht größer ist als die vorher mit einem Schlage ausgeübte. Wuchtige Schläge erzielen bei gleicher Gesamtschlagarbeit also größere Höhenverminderungen als leichte Schläge.

Unverkennbar ist auch der Einfluß, den die Beschaffenheit der Endflächen der Probekörper auf die Höhenverminderung ausübt. Körper mit rauh gemachten Endflächen werden geringere Höhenverminderungen unter den gleichen Beanspruchungen erfahren als solche gleichen Materials, deren Endflächen poliert und womöglich mit Schmiermitteln eingefettet sind. Die Reibung zwischen Endfläche und Aufschlagfläche des Bären bzw. Auflager der Schabotte verhindert hier ebenso wie beim Druckversuch die Querschnittsvergrößerung und damit auch die Längenänderung in der Nähe der Endflächen. Bei Körpern mit rauhen Endflächen wird dieser Reibungsbetrag erheblich größer ausfallen als bei solchen mit glatten Endflächen.

d) Bruchercheinungen.

Auch bei den Schlagversuchen pflegen sich charakteristische Brucherscheinungen zu zeigen, und zwar werden häufig, ähnlich wie beim Druckversuch, Druckkegel gebildet. Fig. 36 zeigt die Wiedergabe der Bruchstücke eines zylindrischen Probekörpers aus Messing mit ursprünglich normalen Abmessungen (Durchmesser gleich Höhe). Das linksseitige Bruchstück, ein fast mathematisch genauer Kegel, ist aus dem rechtsseitigen Stück, das die Umhüllung des Kegels bildete, herausgeschlagen worden, wobei besonders interessant ist, daß die Grundfläche des

Kegels nahezu den ursprünglichen Durchmesser des Probekörpers beibehalten hat. Das Mantelmaterial, das den Kegel einschloß, ist also ähnlich wie beim Druckversuch seitlich hochgequollen und umrandete an den Endflächen die ursprüngliche Grundfläche des Zylinders, die beim Bruch auch Grundfläche des Druckkegels blieb. Unter dem Einfluß der Reibung an den Endflächen hatte der Probekörper, wie beim Druckversuch, tonnenförmige Gestalt ange-

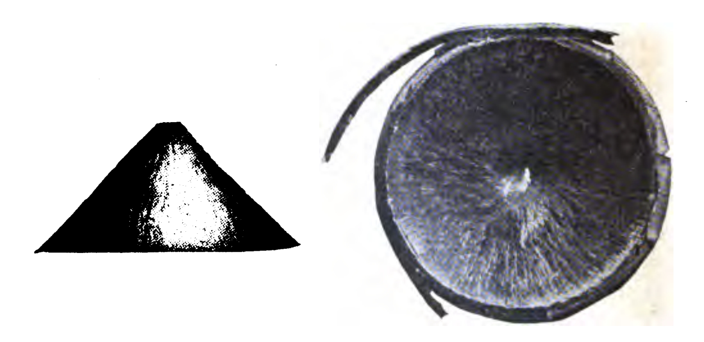


Fig. 36.
Brucherscheinung beim Schlagversuch.

nommen, d. h. die Querschnittsverminderung in der Nähe der Endflächen war gegenüber derjenigen in der Mitte des Probekörpers zurückgeblieben. Interessant ist hierbei auch, daß die Richtung, in der der Druckkegel gebildet wird, ganz willkürlich oder zum mindesten unabhängig davon zu sein scheint, ob der Probekörper den Schlag auf seine obere oder untere Endfläche erhielt. Verfasser hatte wenigstens bei einer großen Anzahl selbst ausgeführter Versuche oft Gelegenheit, diese Erscheinung bestätigt zu sehen.

e) Normalfallwerke.

Für die Ausführung der Schlagversuche als Materialprobe benutzen die öffentlichen Prüfungsanstalten Fallwerke, deren Einzelkonstruktionen bestimmten Vereinbarungen angepaßt sind, damit vergleichbare Versuchsergebnisse erzielt werden. In der ehemaligen Charlottenburger Mechanisch-Technischen Versuchsanstalt und auch im neuen Materialprüfungsamt zu Groß-Lichterfelde ist ein Fallwerk nach Konstruktionsangaben von Martens („Materialienkunde" S. 166) aufgestellt, das den erwähnten Vereinbarungen gemäß als sogenanntes Normalfallwerk zu bezeichnen ist. Seine Konstruktion ist aus Fig. 37 zu ersehen. Es arbeitet mit Bären von 20 bis 100 kg und läßt Fällhöhen bis zu 4,5 m zu. Die Schabotte (*a*) besteht aus einem gut fundierten Gußeisenklotz, auf dem für die einfachen Schlagproben besondere Aufsätze (*b*) mit eingelassenen Stahlplatten als Unterlage für den Probekörper aufgesetzt werden. Der schmiedeeiserne Bär (*c*) ist mit Schellen (*d*) zwischen Eisenbahnschienen (*e*) geführt und hängt in der Auslösevorrichtung, die am Gehänge (*f*) bebefestigt ist und mit Hilfe der Zugkette (*g*) betätigt wird. Das Gehänge (*f*) ist gleichfalls zwischen den Eisenbahnschienen geführt und wird getragen von der Kette (*h*), die über Führungsrollen nach einer Handwinde, mit der der Bär hochgewunden wird, läuft. An der Vorderseite der einen Schiene ist zur Einstellung der beabsichtigten Fallhöhe eine hölzerne Meßlatte angebracht, die in ihrer Höhenlage verschiebbar ist, damit ihre Nullmarke, je nach der Höhe des Probekörpers, verstellt werden kann. Mit Hilfe eines Zeigers, der an einer der Führungschellen des Bären angebracht ist, wird die Fallhöhe für den Bären an der Meßlatte abgelesen. Die Schlagfläche des Bären hat auswechselbare Stahleinsätze.

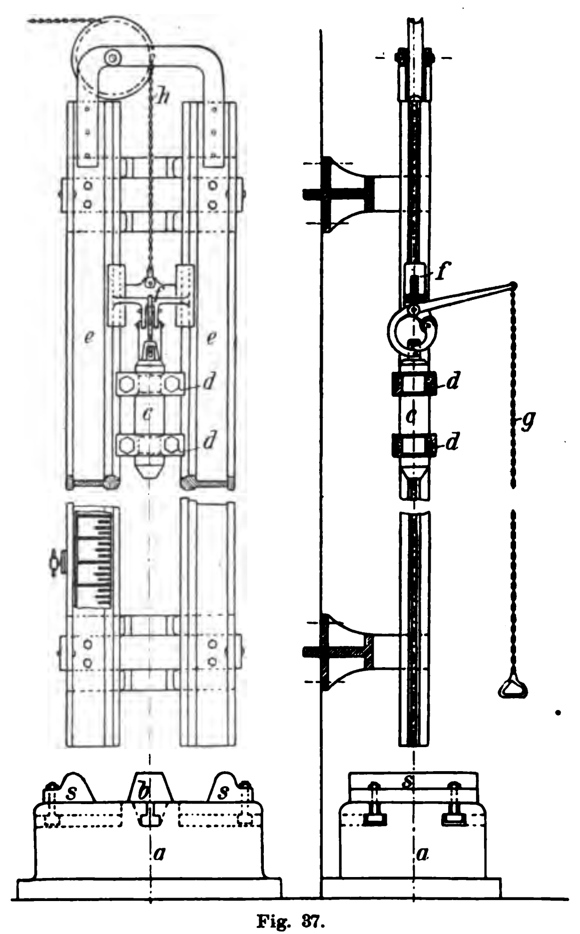


Fig. 37.
Fallwerk nach Martens („Materialienkunde" Tafel 12).

Die Anforderungen, die an ein Normalfallwerk in konstruktiver Hinsicht zu stellen sind, sind von den „Konferenzen zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren“, denen sich auch der „Verein deutscher Eisenbahnverwaltungen“ in der Hauptsache angeschlossen hat, festgelegt.

Sie enthalten unterer anderem Vorschriften über die Größe des Bärgewichtes, über das Material, aus dem Bär und Schabotte herzustellen sind (Stahl, Gußeisen), über Form und Abmessungen der Führungen, Schmierung der Führungen (nur Graphit), Verhältnis des Schabottengewichtes zum Bärgewicht (Schabotte mindestens zehnmal Bärgewicht), über Art und Abmessung des Fundamentes (unelastisch), zweckmäßige Höhe des Fallwerks (höchstens 6 m) und bestimmen ferner, daß jedes Fallwerk zu eichen ist. Für die Prüfung der Fallwerke wird die Verwendung von Normalkupferzylindern empfohlen, welche aus bestem Stehbolzenkupfer hergestellt werden und bestimmte Form und Gewicht haben; das Königl. Materialprüfungsamt gibt solche Normalschlagkörper, die aus einem auf dem Fallwerk des Amtes geprüften Material hergestellt sind, ab und teilt die Längenänderung mit, die sie bei bestimmter Schlagarbeit unter einem den Vorschriften entsprechenden Fallwerke erfahren müssen. Für die Ermittlung des wirksamen Bärgewichtes wird im Königl. Materialprüfungsamte zwischen Bär und Auslösevorrichtung eine Federwage eingebaut, an der man das Bärgewicht abliest, während man den Bären langsam absinken läßt. Diese Ablesung entspicht dem Bärgewicht abzüglich der Reibung zwischen den Führungen, während eine zweite Ablesung an der Federwage während des langsamen Anhebens des Bären Bärgewicht einschließlich Reibung ergibt. Die halbe

Differenz beider Ablesungen ist der Reibungsbetrag; nach den Verbandsvereinbarungen soll die Reibungsarbeit nicht größer als 2 % der Schlagarbeit des Bären betragen, wenn brauchbare Versuchsergebnisse mit dem Fallwerk erzielt werden sollen.

f) Verschiedene Arten des Schlagversuchs.

Die Schlagversuche finden nicht nur als einfache Schlagprobe Verwendung, bei der zylindrische oder würfelförmige Normalkörper eine Stauchbeanspruchung erfahren; es sind vielmehr eine große Anzahl von Abarten mehr oder weniger im Gebrauch, so der Schlagbiegeversuch, der Schlagzerreißversuch, der Schlagscher- und Schlaglochversuch usw. Am häufigsten von diesen Verfahren ist der Schlagbiegeversuch; er findet besonders bei der Prüfung von Eisenbahnmaterialien (Schienen, Achsen usw.) Verwendung, weswegen die auf Seite 95 angeführten Vorschriften für Normalfallwerke eine Reihe von Bestimmungen für die Ausführung von Schlagbiegeversuchen enthalten. Der Probekörper wird für solche Versuche gewöhnlich auf zwei auf der Schabotte angebrachten Stützen *s* (s. Fig. 37) gelagert und der Bär, der für diese Zwecke an der Schlagfläche eine ▽-Form erhält, trifft die Probe in der Mitte zwischen den Auflagern. Als Gütemaßstab wird meistens die unter bestimmten Schlagarbeiten und bestimmten sonstigen Versuchsbedingungen (Stützweite usw.) erzielte Durchbiegung benutzt, oder es wird bei Qualitätsproben z. B. verlangt, daß ein Probestück unter einer bestimmten Schlagarbeit noch nicht zum Bruch kommt.

Die Schlagzerreißprobe findet nur außerordentlich selten Verwendung.

Schlagscher- und Schlaglochversuche pflegt

man mit den in Fig. 34 und 35 dargestellten Einrichtungen, die man auf die Schabotte aufsetzt, vorzunehmen.

Als Materialprobe ist neuerdings viel die sogenannte „Schlagbiegeprobe mit eingekerbten Probestücken“ oder kurz die Einkerbbiegeprobe in Aufnahme gekommen,

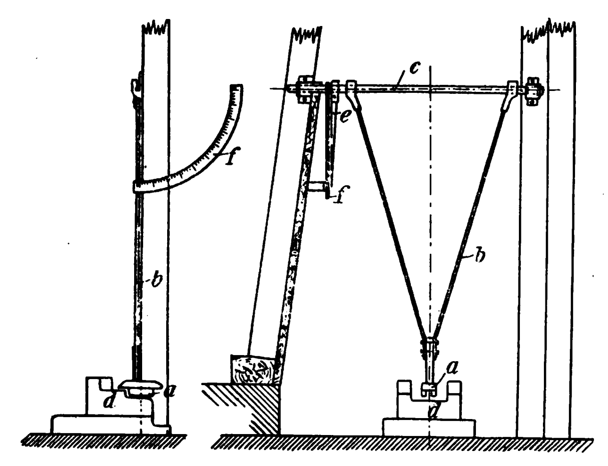


Fig. 38.
Pendelhammer nach Rudeloff im Königl. Materialprüfungsamt („Denkschrift“ S. 329).

wenngleich sie sich noch nicht allgemeine Anerkennung verschafft hat. Soweit sie als eigentliche Biegeprobe mit langsam gesteigerter Belastung anzusehen ist, soll sie erst in einem späteren Abschnitte (S. 109) behandelt werden. Sie wird indessen häufig auch als Schlagbiegeprobe vorgenommen, wobei man zweckmäßig sogenannte Pendelhammer nach dem Prinzip der ballistischen Fallwerke verwendet, weil sie den von der Probe aufgenommenen

Anteil der Schlagarbeit genau zu messen gestatten. Die Konstruktion eines Pendelhammers nach Rudeloff findet sich auf Seite 329 der „Denkschrift zur Eröffnung des Königl. Materialprüfungsamtes in Groß-Lichterfelde von A. Martens und M. Guth“. Sie ist in Fig. 38 wiedergegeben. Ein kleiner Hammer (*a*) von etwa 20 kg Gewicht ist an einem Holzgestänge (*b*) aufgehängt, das an der drehbaren Achse (*c*) befestigt ist. Der Probekörper wird in einer Schabotte (*d*) gelagert; der Hub des Pendelhammers wird an einer bogenförmigen Skala, die an einem der Ständer des Fallwerkes befestigt ist, abgelesen. Auf der Achse (*c*) ist mit Reibung ein Zeiger (*e*) befestigt, der an der Meßskala (*f*) ablaufen kann und mit dem Bärgewicht auf die beabsichtigte Fallhöhe gehoben wird. Läßt man den Bären dann fallen, so trifft seine Aufschlagfläche die Probe und schlägt, nachdem diese gebrochen ist, was man für gewöhnlich schon durch den ersten Schlag zu erreichen sucht, um so viel nach der gegenüberliegenden Seite aus, als der noch nach dem Brechen der Probe verbliebenen lebendigen Kraft des Hammers entspricht. Der Zeiger (*e*) indessen findet senkrecht über dem Probekörper einen Anschlag, so daß er den Weg des Fallbären nur bis zu dessen Aufschlag auf die Probe mitmacht. Aus der Stellung des Zeigers auf der Skala kann man dann, sobald man den Bär in die Nulllage zurückgebracht hat, ablesen, um wieviel der Bär nach dem Bruch der Probe noch über die Nulllage hinweg ausgeschlagen hat; daraus läßt sich leicht der Anteil der Schlagarbeit, der für den Bruch der Probe benötigt wurde, errechnen. Die recht zweckmäßige Einrichtung soll nach den in der genannten Denkschrift gegebenen Anregungen besonders auch für die Ausführung einer Schlagbiegeprobe mit Gußeisen als Qualitätsprobe benutzt werden.

Für besondere Prüfungszwecke sind an einigen öffentlichen Prüfungsanstalten noch Fallwerke kleinerer und kleinster Abmessungen (Bärgewichte von nur $^1/_2$ kg und noch weniger) im Gebrauch, deren Konstruktionsgrundsätze indessen die gleichen wie bei den Normalfallwerken sind. Ein solches Fallwerk hat z. B. in der früheren Charlottenburger Versuchsanstalt für die vergleichende Prüfung von Jagdschrot, dessen Härte bestimmt werden sollte, Benutzung gefunden.

C. Dauerversuche (Schwingungsfestigkeit).

Im Gegensatz zu den beschriebenen gewöhnlichen Zerreiß-, Druck-, Biege- usw. Versuchen, bei denen der Probekörper durch langsame Steigerung der Belastung meistens beim erstmaligen Versuch zum Bruch gebracht wird, wird beim Dauerversuch die Belastung nicht bis an die Bruchgrenze gesteigert; der Probekörper wird vielmehr mit einer geringeren Belastung einer großen Zahl von Anstrengungen unterworfen, wobei schließlich diejenige Spannung ermittelt wird, die das Material millionenmal hintereinander zu tragen vermag, ohne zum Bruche zu kommen. Wenngleich die Dauerversuche als solche alt sind, ja, wie auf Seite 7 erwähnt, eigentlich in Deutschland zum Ausgangspunkt für eine wissenschaftliche Materialprüfung wurden, so haben sie lange Jahre hindurch nur rein wissenschaftliches Interesse gehabt, während der gewöhnliche Zerreißversuch fast ausschließlich zur Materialbeurteilung herangezogen wurde. Erst in neuerer Zeit hat sich die Erkenntnis, besonders für die Materialien des Maschinenbaues, immer mehr Bahn gebrochen, daß der Zerreißversuch nicht immer ein einwandfreies und vollkommenes Mittel zur Beurteilung de

Materials bedeutet, daß im Gegenteil Schlüsse über das Verhalten eines Materials bei seiner Verwendung im Betriebe weit zuverlässiger auf Grund von Dauerversuchen, die den Verwendungszwecken des Materials anzupassen sind, gezogen werden können. Die auf S. 16 im zweiten Bändchen erwähnten Versuche Bauschingers über die Veränderung der P- und S-Grenze lassen deutlich erkennen, von wie einschneidender Wirkung mehrmalige Beanspruchung eines Materials auf die Festigkeitseigenschaften ist.

Wöhler, der die ersten planmäßigen Dauerversuche ausgeführt hat, fand als Hauptgesetz bei seinen Versuchen, daß sich der Bruch eines Materials durch vielfache Schwingungen (d. h. Be- und Entlastungen zwischen bestimmten Spannungsgrenzen), von denen keine die absolute Bruchgrenze erreicht, herbeiführen läßt. Praktischen Wert hat mithin die Aufsuchung derjenigen Spannung, die das Material zu tragen vermag, ohne durch eine so große Zahl von Beanspruchungen, wie sie bei späterer Verwendung des Materials im Betriebe nicht mehr in Frage kommen kann, zu Bruch zu gehen. Launhardt hat diese Spannung mit Arbeitsfestigkeit (σ_N) bezeichnet. Spangenberg, der die Wöhlerschen Versuche fortgesetzt hat, gibt für einige Materialien die nachstehenden Werte an:

Eisen 2100 kg/qcm ($\sigma_B = 3800$—4200 kg/qcm),
Stahl 3100 kg/qcm ($\sigma_B = 5000$ kg/qcm und mehr),
Bronze 850—1050 kg/qcm ($\sigma_B = 3000$ kg/qcm u. mehr).

Die in Klammern gesetzten Werte geben die mittleren Zugfestigkeiten, die durch gewöhnliche Zerreißversuche für die betreffenden Materialarten gefunden sind. Diese vor 30 Jahren gefundenen Werte für die Arbeitsfestigkeit dürften indessen den heutigen Materialverhältnissen nicht

mehr entsprechen, da sich der Materialcharakter der Konstruktionsmaterialien im Laufe der letzten Jahrzehnte ganz erheblich verändert hat. Man erkennt, daß die Arbeitsfestigkeit erheblich tiefer als die eigentliche Bruchfestigkeit liegt. Wöhler war der Ansicht, daß die Ausführung einer Dauerversuchsart (z. B. auf Zug oder Biegung) genüge, um das Verhalten des Materials auch bei anderer Dauerbeanspruchungsart durch Rechnung ermitteln zu können. Spangenberg bestritt indessen auf Grund seiner Versuchsergebnisse mit Dauerzug-, Dauerbiege-, Dauertorsionsversuchen diesen Satz. Praktische Anwendung einer Dauerversuchsbeanspruchung suchte Wöhler nicht nur in den Betriebsbeanspruchungen z. B. einer Kolbenstange oder anderer Maschinenteile, die dauerndem Wechsel zwischen Be- und Entlastung unterworfen sind, er hielt es auch für höchst wahrscheinlich, daß die vielfach wiederholte Verschiebung der Materialmolekel unter dem Einfluß der Ausdehnung durch die Wärme, die beispielsweise das Material eines Dampfkessels erfährt, ebenfalls auf Zerstörung des Zusammenhanges hinwirkt. Martens hat in seinem Handbuch der Materialienkunde auf S. 219 die alten Wöhlerschen und andere Dauerversuchsmaschinen beschrieben. Hierauf näher einzugehen, verbietet der Umfang dieses Bändchens; ebenso wie auch ein Eingehen auf die neuen modernen Versuchseinrichtungen für Dauerversuche, wie sie neuerdings im Königl. Materialprüfungsamte aufgestellt sind, aus dem gleichen Grunde nicht angängig ist. Die Einrichtungen sind eingehend in der „Denkschrift zur Eröffnung des Königl. Materialprüfungsamtes“ beschrieben. Neuere Veröffentlichungen über amerikanische Dauerversuchseinrichtungen finden sich zusammengestellt in „Dinglers *polytechn. Journal*“, Jahrgang 1905. Ergebnisse neuerer

Dauerversuche siehe: Smith, Philosophical Transact. of the Royal Society of London, Vol. 199, Seite 265. Gardner, Journ. of the Iron and Steel Institute 1905, Nr. 1, Seite 481. Rogers, ebenda, Seite 486. Stanton and Bairstow, Proceedings of the Institution of Civil Eugineers, Vol. 166, Session 1905/06, Teil 4.

D. Technologische Proben.

a) Begriffsfeststellungen.

Mit diesem Namen bezeichnet man diejenigen Materialproben, die über den Grad der Zähigkeit, Brüchigkeit und auch Bearbeitbarkeit für bestimmte Verwendungszwecke Aufschluß geben sollen. Sie finden in der Hauptsache als Qualitätsprobe bei der Prüfung der Konstruktionsmaterialien (Kesselbleche usw.) Verwendung.

Eine außerordentliche Vielseitigkeit der Vorschriften ist besonders für diese Art der Materialprüfung zu bemerken, obgleich gerade hier Einheitlichkeit der Ausführungsvorschriften mehr noch als bei anderen Versuchsarten sehr erwünscht wäre, weil die technologischen Proben, die ohne besondere Prüfungseinrichtungen mit den Hilfsmitteln jeder Werkstatt auszuführen sind, große Verbreitung gefunden haben. Die einzelnen großen Interessentengruppen haben meistens unabhängig voneinander Prüfungsvorschriften festgesetzt, nach denen bei Abnahmeproben zu verfahren ist (Hamburger und Würzburger Normen; Vorschriften des Verbandes deutscher Eisenhüttenleute, des Germanischen Lloyds, der Kaiserlichen Marine usw.); alle weichen in wichtigen Punkten nur unwesentlich voneinander ab, so daß es ohne große Schwierigkeiten möglich wäre, einheitliche, allen Interessen gerecht werdende Vorschriften für diese Proben zu schaffen, die zugleich unter

Ausnutzung der Erfahrungen der öffentlichen Prüfungsstellen allen Materialeigentümlichkeiten besser angepaßt werden könnten. Solche Vereinheitlichung der Prüfungsverfahren hat auch Martens in seiner „Materialienkunde" grundsätzlich angestrebt.

Im folgenden werden besonders die Vorschriften und Versuchsverfahren mitgeteilt werden, nach denen an den öffentlichen Prüfungsstellen, besonders am Königl. Materialprüfungsamt, technologische Proben ausgeführt werden. Man hat zu unterscheiden zwischen Biegeproben, Schmiedeproben und technologischen Proben verschiedener Art.

b) Biegeproben.

Die Biegeprobe dient in erster Linie dazu, den Grad der Zähigkeit oder Sprödigkeit des Materials unter verschiedenen Versuchsbedingungen und bei verschiedenen Materialzuständen zu ermitteln. Die Proben in Form von Flacheisen oder Blechstreifen (besonders in Anwendung für Kesselbleche) werden über einen Dorn oder eine Kante mit bestimmtem Abrundungsradius oder über eine Rolle von bestimmtem Durchmesser von Hand aus mit geeigneten Werkzeugen (Hammer) oder mit Hilfe geeigneter maschineller Vorrichtungen so gebogen, daß die beiden Schenkel oder Probenenden schließlich zur Aufeinanderlage (Fig. 39) kommen, vorausgesetzt, daß nicht vorher bereits Bruch der Probe eingetreten ist. Da bei dieser Art der Beanspruchung das Material an der auf Zug beanspruchten Seite eine starke Dehnung erfahren muß, so wird, sobald

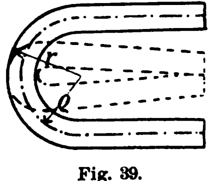


Fig. 39.
Biegeprobe.

In der Biegestelle der Probe und ihrer Nähe, also meistens in der Mitte der Proben, werden die Kanten gebrochen und abgerundet, damit der von der Bearbeitung der Probe (diese wird meistens mit schneidenden Werkzeugen, Kaltsägen usw., vorgenommen) stehengebliebene Grat entfernt wird. Er würde leicht beim Biegen der Probe zu Kantenrissen Veranlassung geben, die die Materialbeurteilung stören könnten.

Die einfachste Ausführung der Biegeprobe erfolgt in der Weise, daß man die Probe über die abgerundete Amboßkante mit dem Hammer schlägt. Wegen der mancherlei Willkürlichkeiten, die indessen bei der Ausführung dieser rohen Proben obwalten können, haben die Konferenzen zur Vereinheitlichung der Prüfungsverfahren als Grundsatz aufgestellt, daß die Biegeprobe nur mit maschinellen Vorrichtungen ausgeführt werden soll. Geeignete Vorrichtungen, von Hand oder hydraulisch betrieben, sind in großer Zahl vorgeschlagen worden. Die Proben werden mit ihnen über Dorne von bestimmtem Abrundungsradius gebogen. Für diese Abrundungsradien schreiben die Vorschriften fast durchweg die Bedingung $r = a$ (Radius gleich Probendicke) vor.

Man unterscheidet bei den Biegeproben je nach Materialzustand und Beschaffenheit der Probe zwischen Kaltbiegeproben, Blaubruchproben, Rotbruchproben, und zwar können diese Proben entweder im verletzten (Proben mit Einkerbungen oder Bohrungen) oder unverletzten Zustand des Versuchsstückes ausgeführt werden.

Mit Kaltbiegeproben bezeichnet man im Gegensatz zu den bei höheren Wärmegraden ausgeführten Proben solche, die bei Zimmerwärme vorgenommen werden. Das Material wird dabei entweder im sogenannten Anlieferungszustande, d. h. so, wie es vom Erzeuger ange-

liefert wurde, oder im geglühten oder auch im abgeschreckten Zustande geprüft. Die Prüfung im geglühten Zustande gibt Aufschluß darüber, ob das Material im eingelieferten Zustande von der Bearbeitung her mit Spannungen behaftet war, die seine Formänderungsfähigkeit einschränkten. Das Material erfährt nämlich bei jeder Bearbeitung, die eine Beanspruchung über die Formänderungsgrenze hinaus verursacht (Kaltwalzen, hämmern usw.), eine Veränderung seiner ursprünglichen Formänderungsgrenze; die Fließgrenze rückt höher hinauf (s. II. S. 17), das Material wird weniger formänderungsfähig, wird härter. Ein solches Material ist mit Spannungen behaftet und verändert andauernd seine Formänderungsgrenze (s. II. S. 17). Durch gleichmäßiges Ausglühen (Temperatur für die verschiedenen Materialien verschieden; für Flußeisen zwischen 750 und 800° C) und darauf folgende langsame Abkühlung werden diese Spannungen wieder beseitigt und das Material wird in seinen ursprünglichen spannungsfreien Naturzustand übergeführt.

Die Biegeprobe im abgeschreckten Zustande soll Aufschluß über die Härtefähigkeit des betreffenden Materials geben. Bekanntlich zeigen bestimmte Eisensorten die Eigentümlichkeit, wesentlich härter zu werden, sobald sie im rotwarmen Zustande in kaltem Wasser oder Öl abgeschreckt werden. Die Eigentümlichkeit beruht in einer Umwandlung der Kohlenstoffformen des Eisens (s. Metallographie II. S. 154). Für die Abschreck-Biegeprobe werden die Proben hellrot warm gemacht (750—800°) und schnell in Wasser von etwa 28° C unter Umrühren abgeschreckt. Die Temperatur von 28° C ist erfahrungsgemäß die geeignetste, um die Kohlenstoffumwandlung zu vollziehen; durch das Schwenken im Wasser vermeidet man

in der Regel das Krummwerden der Probe. Die Abschreckprobe bietet besonders dann Interesse, wenn die Frage zu beantworten ist, ob das vorliegende Material als Stahl anzusprechen ist. Die öffentlichen Prüfungsstellen werden sehr häufig vor diese Frage gestellt, obgleich kaum ein Begriff willkürlichere Definition erfahren hat als der Begriff Stahl. Im zweiten Bande dieses Werkchens auf Seite 15 ist die Namenregelung, wie sie in den verschiedenen Kulturländern für Stahl gebräuchlich ist, angegeben. Das Königl. Materialprüfungsamt bezeichnet als Stahl ein Schmiedeeisen, das mindestens 50 kg/qmm Zugfestigkeit besitzt, nicht mehr als 0,5 % Kohlenstoff enthält und härtbar ist. Dieser Definition haben sich viele Interessentengruppen angeschlossen. Zur Ermittlung der Härtbarkeit des Materials ist nun die Biegeprobe besonders geeignet, weil bei härtbarem Material die Biegegröße für den abgeschreckten Zustand erheblich kleiner ausfallen wird, als für den angelieferten oder geglühten Zustand.

Bei der Blaubruchprobe wird das Material im sogenannten blauwarmen Zustande geprüft; die Proben sind hierbei bis auf etwa 300° C erhitzt und zeigen, mit einer Feile an den Kanten befeilt, deutlich die blaue Anlauffarbe. War das Material noch nicht hoch genug erhitzt, so pflegt die blaue Anlauffarbe schnell wieder zu verschwinden, hingegen dunkelt sie stark nach, wenn die Erhitzung zu weit getrieben wurde. Die Temperatur von 300° ist besonders für Flußeisen eine kritische Grenze in bezug auf Festigkeit und Formänderungsvermögen. Nach zahlreichen Versuchen von Martens, Rudeloff, Bach u. a. steigt die Festigkeit des Flußeisens bis etwa auf 200—300° um mehrere Prozent, um dann nach und nach bei höheren Temperaturen wieder abzunehmen (s. II. S. 19); hingegen nimmt die Formänderungsfähigkeit bis 300° erheblich

ab, um dann wieder zuzunehmen. Bei 300° wird das Material am wenigsten Zähigkeit zeigen, am sprödesten sein und daher bei der Biegeprobe am leichtesten brechen. Für viele Verwendungszwecke ist die Kenntnis des Verhaltens des Materials in der Blauwärme daher von hohem Interesse.

Ähnlich verhält es sich mit der sogenannten Rotbruchprobe, bei der die Proben im dunkelrotwarmen Zustande (500—600°, im Dunkeln rotglühend erscheinend) geprüft werden. Manche Eisensorten, die, bei Zimmertemperatur und Blauwärme geprüft, zufriedenstellende Biegegrößen lieferten, pflegen bei der Rotbruchprobe vorschnell zum Bruch zu kommen; sie sind rotbrüchig, eine Eigenschaft, die auf zu hohen Schwefelgehalt zurückgeführt wird und besonders für solche Materialien, die im rotwarmen Zustande zum Zwecke der Formgebung Bearbeitung erfahren müssen, sehr unangenehm ist.

Man kennt dann noch eine Reihe von Biegeproben, bei denen man die Proben vor dem Versuch absichtlich verletzt, um festzustellen, inwieweit das Material besonders in der Nähe der verletzten Stelle an Zähigkeit einbüßt. Bei der sogenannten Einkerbbiegeprobe werden die Proben an der auf Zug beanspruchten Seite senkrecht zur Längsachse mit einer Einkerbung versehen, die entweder eingehobelt oder eingemeißelt sein kann. Die letztere Prüfungsart ist die schärfere, weil durch das Einmeißeln das Material der Probe erheblich stärkerer Beeinflussung unterworfen wird als beim Einhobeln. Der Anbruch des Materials ist bei der Einkerbbiegeprobe schwieriger zu beobachten, weil der im Grunde der Kerbe stehengebliebene Grat beim Biegen der Probe sein Aussehen verändert und dann leicht zu der irrtümlichen Annahme Veranlassung gibt, daß das Material be-

reits angebrochen ist. Die Einkerbprobe wird im kalten und im blauwarmen Zustande ausgeführt.

Neuerdings ist, wie schon S. 97 bemerkt, der Einkerbbiegeprobe erweiterte Bedeutung für die Materialbeurteilung beigelegt worden, besonders auch deswegen, weil die Bruchfläche der Einkerbbiegeproben nahezu das natürliche Gefüge des Materials zeigt. Infolge der Einkerbung bricht die Probe, ohne daß die im Bruchquerschnitte liegenden Gefügeteile große Formänderungen zu erleiden haben. Das meistens grobkörnige Gefüge des Flußeisens nimmt nicht das kurzschuppige Aussehen an, wie es z. B. die Bruchstellen eines zerrissenen Stabes des gleichen Materials aufweisen (s. S. 56), sondern behält das natürliche Aussehen. Allgemeinere Verbreitung hat sich indessen die Einkerbbiegeprobe noch nicht zu verschaffen gewußt, besonders weil es außerordentliche Schwierigkeiten bereitet, die Einkerbungen, deren Form zweifellos von Einfluß auf das Versuchsergebnis ist, gleichartig zu gestalten, was unbedingt erforderlich sein wird, wenn vergleichbare Versuchsergebnisse erzielt werden sollen.

Häufig angewendet wird ferner auch die Biegeprobe mit gelochten Proben, bei denen das Loch in der Mitte der Probe, das in die am stärksten gebogene Stelle fällt, entweder gebohrt oder gestanzt ist. Letztere Ausführungsart wird wegen der stärkeren Inanspruchnahme des in der Nähe des Loches liegenden Materials die schärfere Probe bedeuten. Der Lochdurchmesser sollte bei diesen Proben im bestimmten Verhältnis zur Probenbreite stehen; Martens (Materialienkunde S. 259) schlägt hierfür vor: $d = 2a$; $b = 5a$ (a = Probendicke, d = Lochdurchmesser, b = Probenbreite). Erwähnt sei noch, daß man vielfach die Biegeprobe auch bei Wärmegraden unter

0 (bis -40^0 und tiefer) ausführt, um festzustellen, ob das Material frostbrüchig ist.

c) Schmiedeproben.

Die Schmiedeproben werden in ihrer Ausführung ganz dem jeweiligen Verwendungszweck des Materials angepaßt. Es seien hier nur die am häufigsten angewandten kurz beschrieben.

Die sogenannte Ausbreiteprobe bezweckt, den Grad der Hämmerbarkeit des Materials zu ermitteln, und wird im kalten oder rotwarmen Zustande ausgeführt. Ein Flachstab wird zu diesem Zweck an einem Ende mit der Hammerfinne bearbeitet und so weit ausgebreitet, bis Risse zu beobachten sind. Das Verhältnis der Probenbreite nach dem Ausbreiten bis zur Rißbildung zur ursprünglichen Probenbreite bildet den Gütemaßstab für Beurteilung des Materials (Martens, Materialienkunde S. 263). Für gutes Flußeisen oder Schweißeisen wird meistens Ausbreitung bis auf dreifache Probenbreite ohne Rißbildung verlangt werden können.

Die Stauchprobe wird hauptsächlich zur Prüfung von Nieteisen angewandt. Zylindrische Probekörper (aus der Rundstange herausgeschnitten, Walzzunder auf der Probe belassen) mit $l = 2\,d$ (l = Probenlänge, d = Probendurchmesser) werden im rotwarmen Zustande mit dem Hammer zusammengestaucht, bis Mantelrisse zu beobachten sind. Die Stauchung wird bei gutem Nieteisen bis auf mindestens $^1/_3\,l$ ohne Mantelrisse möglich sein müssen.

Die Loch- oder Aufdornprobe wird mit Blechstreifen ausgeführt. Diese werden im rotwarmen Zustande mit dem Lochhammer zunächst gelocht; durch das Loch wird dann ein konischer Dorn (gebräuchliche

Abmessungen $d_u = 20$ mm, $d_o = 30$ mm, $L = 80$ mm) hindurchgeschlagen. Das Material muß dies Aufdornen ertragen, ohne Risse zu bekommen.

Zur Ermittlung der Schweißbarkeit dient ferner noch die sogenannte Schweißprobe. Die Enden zweier Flacheisenstäbe werden hierbei in Schweißhitze miteinander verschweißt und zur Erprobung der Güte der Schweißung nach der Abkühlung über die Amboß- oder Schraubstockkante bis zum Aufeinanderliegen der beiden Probenschenkel zusammengebogen. Gut schweißbares Material wird diese Probe aushalten müssen, ohne in der Schweißnaht zu brechen.

Mit fertigem Walzgut kommen ferner noch eine Anzahl technologischer Proben zur Anwendung, die indessen nicht alle hier beschrieben werden können. Erwähnt seien das Einschneiden, Flachdrücken und Aufrollen der Schenkel an Winkeleisen, die sogenannte Treibprobe mit Blechen, das Bördeln, das Anarbeiten von Flanschen an Rohrabschnitte, die Stauch- und Druckprobe mit Rohrabschnitten. Die Ausführungsbestimmungen für diese Proben werden immer dem jeweiligen Verwendungszweck der zu prüfenden Materialien angepaßt werden müssen und daher in den Abnahmevorschriften festgelegt werden.

d) Technologische Proben verschiedener Art.

Allgemeinere Verbreitung haben die technologischen Proben zur Prüfung von Drähten gefunden, die zu Drahtseilen verarbeitet werden sollen. Sie umfassen neben der Ermittlung der Zugfestigkeit die sogenannte Hin- und Herbiegeprobe und die Verwindungsprobe.

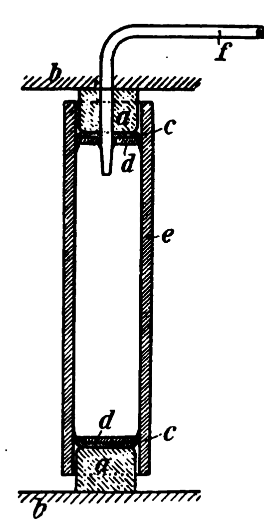
Bei der Hin- und Herbiegeprobe werden die Probedrähte zwischen Schraubstockbacken eingespannt,

deren Kanten nach bestimmtem Radius abgerundet sind. Das freie Drahtende wird mit einer geeigneten Vorrichtung um 90° gegen die senkrechte Lage zunächst über die eine Schraubstockkante gebogen, zurück in die senkrechte Lage gebracht und dann über die andere Schraubstockkante um 90° gebogen, wieder in die senkrechte Lage zurückgebracht und so fort hin und her gebogen, bis Bruch erfolgt. Die Anzahl der bis zum Bruch gezählten Biegungen, die Biegezahl, gilt als Gütemaßstab. Die Biegung aus der senkrechten Lage um 90° nach einer Seite und zurück in die senkrechte Lage wird als eine Biegung gezählt.

Bei der Verwindeprobe wird das eine Ende des Drahtes festgespannt und vom anderen Ende her der Draht um seine Längsachse gedreht, bis Bruch erfolgt. Die Anzahl der Verwindungen, der Drehungen um die Längsachse, wird gezählt und dient als Gütemaßstab.

Zu den technologischen Proben sind auch die Wasserdruckproben zu zählen, bei denen Rohre oder Hohlgefäße durch inneren Wasserdruck geprüft und die Bruchbelastung, gewöhnlich mit Hilfe eines Manometers in Atmosphären, sowie hier und da auch die Formänderung gemessen werden. Die Stahlgefäße zum Transport und Aufbewahren von verdichteten Gasen (Sauerstoff, Wasserstoff, Kohlensäure usw.) werden z. B. durchgängig vor der Ingebrauchnahme mit einem inneren Druck probiert, der höher als der Gebrauchsdruck ist; sie dürfen bei diesen Belastungen keine bleibenden Formänderungen erfahren. Rohrabschnitte müssen für den Versuch an beiden Enden abgedichtet werden; was zweckmäßig durch Lederstulpen geschieht. Martens empfiehlt (Materialienkunde S. 270), letztere innen mit Leim auszugießen, dem etwas chromsaures Kali zugesetzt wurde, damit er in Wasser weniger löslich wird. Der Leimeinguß wirkt wie ein

Gummipolster und begünstigt die feste Anlage der Manschettenränder an den Rohrwandungen. Ein zweckmäßiger Einbau der Rohrabschnitte für diese Versuche, wie er im Königl. Materialprüfungsamte im Gebrauch ist, ist in Fig. 41 dargestellt. Die Holzstücke a dienen dazu, die in senkrechter Richtung wirkenden Druckkräfte aufzunehmen und auf das Rahmenwerk b b zu übertragen. Auf diese Weise bleibt das Versuchsrohr von senkrecht wirkenden Druckspannungen frei und wird nur auf inneren Druck beansprucht. Wenn es sich um dünnwandige Rohre oder Gefäße handelt, was ja meistens der Fall sein wird, errechnet sich die Spannung, d. h. die Belastung der Querschnittseinheit, beim inneren Druckversuch nach $\sigma = p \frac{d}{2a}$, worin p den mit Manometer gemessenen inneren Druck in Atmosphären, d den inneren Durchmesser, a die Wandstärke des Rohrabschnittes oder Gefäßes bedeutet. Auf diese Weise werden z. B. auch Gewehrläufe auf inneren Druck geprüft und gesprengt, wobei Innendrucke erforderlich sind, die nach Tausenden von Atmosphären zählen. Das Königl. Materialprüfungsamt besitzt Preßzylinder, mit denen Innendrucke bis zu 10 000 atm. erzeugt werden.



a = Holzklötze. b = Widerlager. c = Ledermanschetten. d = Leimeinguß. e = Versuchsrohr. f = Druckwasserzuleitung.

Fig. 41. Versuchseinrichtung des Materialprüfungsamtes für Wasserdruckproben mit Rohren.

Der Zylinder dieser Vorrichtung ist nach Art der Geschützrohre aus mehreren warm aufeinandergezogenen Ringen hergestellt, der Kolben hat nur einen Durchmesser von 34 mm. Der Zylinder wird als Druckkörper in eine Prüfungsmaschine eingebaut; auf den Kolben des Preßzylinders wirkt die von der Prüfungsmaschine übertragene Kraft. Der im Innern des Zylinders erzeugte Wasserdruck wird in kupfernen Rohrleitungen (10 mm äußeren, 1 mm inneren Durchmesser) nach dem Innern des Versuchsrohres weitergeleitet.

E. Härteprüfung.

Wie schon auf Seite 20 erörtert, hat der Begriff Härte mannigfache Auslegung erfahren, ohne daß es indessen gelungen wäre, eine wirklich nach jeder Richtung hin zutreffende Begriffserklärung zu finden. Ebenso zahlreich wie die Begriffserklärungen sind auch die Vorschläge zur Messung der Härte. Von vornherein muß bei allen diesen Verfahren davon abgesehen werden, Härte in absolutem Maß zu messen; die Meßverfahren können immer nur mit Vergleichsmaßstäben arbeiten und bedingen, wenn die Ergebnisse verschiedener Prüfungsstellen miteinander verglichen werden sollen, auch vollkommen gleichartig gebaute Meßapparate mit gleichen Konstanten.

Eine der bekanntesten älteren Härtebestimmungen ist diejenige mit Hilfe der sogenannten „Mohsschen Härteskala“, die von Mohs für mineralogische Zwecke aufgestellt ist und einige besonders charakteristische Minerale in nachstehender Reihenfolge ihrer Härte nach einordnet:

1. Talk,	6. Feldspat,
2. Gips,	7. Quarz,
3. Kalkspat,	8. Topas,
4. Flußspat,	9. Korund,
5. Apatit,	10. Diamant.

8*

Von diesen Mineralen ritzt jedes das in der Skala an vorhergehender Stelle stehende, und es wäre möglich, auch die Metalle nach dieser Skala in bezug auf ihre Härte einzuordnen. Indessen hat dies Verfahren für diesen Zweck nur wenig Anklang und Verbreitung gefunden.

Mehr im Gebrauch sind Verfahren, bei denen das Eindringen eines zweiten Körpers in den zu prüfenden Körper als Maßstab für die Härte benutzt wird, wobei zu unterscheiden ist zwischen Eindring- und Ritzverfahren. — Beim Eindringverfahren werden Stempel der verschiedensten Form verwendet, die unter Belastung, meistens durch eine Prüfungsmaschine, in den zu prüfenden Körper eingedrückt werden, wobei entweder die Belastung für bestimmte Eindrucktiefen oder die Eindrucktiefen für bestimmte Belastungen als Vergleichsmaßstab dienen. Auf diesem Grundsatz beruhen die Verfahren von Middlberg, Kerpely, Auerbach-Kirsch, Rudeloff-Föppl, die sich im großen und ganzen nur durch die Form der verwendeten Stempel unterscheiden.

In neuester Zeit ist besonders das Verfahren von Brinell in Aufnahme gekommen, der die Härte mit Hilfe von Stahlkugeln, die in den zu prüfenden Körper eingedrückt werden, bestimmt und als Maß den Eindruck (Durchmesser oder Tiefe der Eindruckstelle) bei bestimmter Belastung benutzt. Das Verfahren hat den Vorzug leichter Ausführbarkeit, besonders auch deswegen, weil es nicht besonderer Herstellung von Probestücken bedarf.

Unter den Ritzverfahren ist das Verfahren von Martens (Materialienkunde S. 241) zu nennen, der hierzu einen besonderen Apparat konstruiert hat, dessen Schema in Fig. 42 dargestellt ist. Der Wagebalken W trägt auf der einen Seite ein Laufgewicht, das längs einer am Hebel angebrachten Teilung verschoben werden kann.

Am anderen Ende des Wagebalkens ist ein Diamant D eingesetzt, dessen Spitze nahezu unter 90^0 zugeschärft ist. Mit diesem Diamanten kann das Probestück, das auf S befestigt wird, unter verschiedenen Belastungen, die durch Verschieben des Laufgewichtes hervorgebracht werden, geritzt werden. Das Ritzen geschieht durch Verschieben des Auflagertisches mit der Probe gegen den Diamanten; es werden unter verschiedenen Belastungen auf dem Probestücke in bestimmten Abständen voneinander

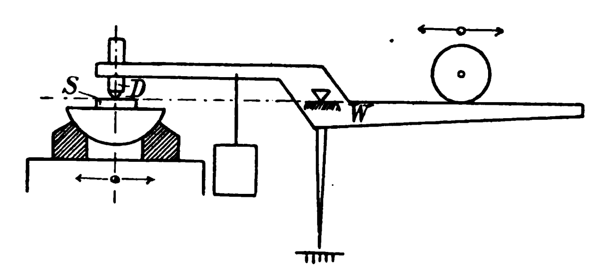


Fig. 42.
Ritzhärteprüfer nach Martens („Materialienkunde" S. 241).

Strichgruppen erzeugt und die Ritzbreite der einzelnen Striche unter dem Mikroskop ausgemessen. Aus Strichbreite und Belastung des Diamanten wird der Vergleichsmaßstab gebildet. Nach dem Vorschlage von Martens sollte als Härtemaß diejenige Belastung des Diamanten in Grammen gelten, unter der in dem zu prüfenden Material eine Strichbreite von 0,01 mm erzielt wird.

Im gewöhnlichen Sprachgebrauch des Technikers decken sich die Begriffe Härte mit hoher Festigkeit, — ein sehr harter Stahl ist gewöhnlich ein Stahl mit hoher Festigkeit, dessen Fließgrenze (σ_S) zugleich nahe an der Bruchgrenze (σ_B) liegt. Es hat daher auch nicht an Vor-

schlägen gefehlt, die Festigkeitseigenschaften als Maßstab für die Härte zu benutzen. Indessen ist diese Identität zwischen Härte und Festigkeit nicht bei allen Materialien zutreffend. Gußeisen z. B., ein harter Körper, hat nur geringe Zugfestigkeit. — Allgemein ist ferner noch zu bemerken, daß die meisten Härteprüfungsverfahren, besonders aber die Ritzverfahren, der Ungleichförmigkeit besonders unserer Konstruktionsmaterialien zu wenig Rechnung tragen, weil sie die Härte nur an der Oberfläche, die häufig völlig andere Festigkeitseigenschaften zeigt wie das Kernmaterial, bestimmen. — Alles in allem bedarf es noch der Schaffung eines ganz einwandfreien Verfahrens, wenngleich die von Brinell angegebene Härteprüfung viel Aussicht auf gute Verwendbarkeit bietet.

III. Hilfsmittel für Festigkeitsversuche.

Die Materialprüfungstechnik bedarf besonders für die Festigkeitsversuche der maschinellen Hilfsmittel, um die Versuchsmaterialien den beabsichtigten Beanspruchungen zu unterwerfen und um die vom Probekörper erlittenen Formänderungen zu messen. Ersterem Zwecke dienen die Prüfungsmaschinen, letzterem die Meßwerkzeuge.

1. Die Prüfungsmaschinen.

a) Allgemeines.

Wie schon auf Seite 29 erwähnt, hat die wachsende Bedeutung der Materialprüfungstechnik eine ungeheure Mannigfaltigkeit in der Konstruktion von Prüfungsmaschinen gezeitigt. Ohne näheres Eingehen auf Konstruktionseinzelheiten seien hier nur die wichtigsten und bekann-

testen von ihnen kurz skizziert. Eine Fülle von Material über Einzelheiten findet der Konstrukteur in Martens' Handbuch der Materialienkunde (Abschnitt IV).

Die drei wichtigsten Teile einer Prüfungsmaschine sind: der Krafterzeuger, der Kraftmesser, das Maschinengestell. Der Krafterzeuger bringt durch geeignete Vorrichtungen die Kräfte in der beabsichtigten Größe und Richtung zur Wirkung auf den Probekörper.

Der Kraftmesser gestattet, die vom Probekörper aufgenommenen Kräfte zu messen. Das Maschinengestell ist vermittelndes Konstruktionsglied zwischen Krafterzeuger und Kraftmesser. Es ermöglicht den sogenannten Kraftschluß, indem es den Kreis, in dem die zur Wirkung kommenden Kräfte verlaufen, schließt: Krafterzeuger — Probekörper — Kraftmesser — Maschinengestell — Krafterzeuger. Es gestattet ferner, die ganze Maschine mit ihrem Fundament in feste Verbindung zu bringen, sofern es sich nicht um kleinere, transportable Maschinen handelt, und dient schließlich auch dazu, um Hilfseinrichtungen, wie Schaulinienzeichner oder Meßapparate, an der Maschine zu befestigen.

b) Krafterzeuger.

Für den Krafterzeuger kann hydraulischer oder mechanischer Antrieb benutzt werden. Der Krafterzeuger ist also entweder eine hydraulische Presse oder eine Schraubenspindel, die mittels Schneckenrades von Hand oder mit Hilfe eines motorisch betriebenen Vorgeleges betätigt wird. Im ersteren Falle wird der Kolben der hydraulischen Presse der die Kraft übertragende Teil sein; der Probekörper wird also mit dem Kolben gewöhnlich unter Vermittlung von Einspannvorrichtungen (s. S. 30) in Berührung gebracht.

Im Falle des mechanischen Antriebes wird die den Probekörper fassende Einspannvorrichtung an der Schraubenspindel befestigt sein.

Obgleich der hydraulische Antrieb umfangreichere maschinelle Vorkehrungen erfordert als der mechanische, hat er doch die größere Verbreitung gefunden. Weitaus die meisten Konstruktionen besonders größerer Prüfungsmaschinen haben hydraulischen Krafterzeuger. Seine Vorzüge gegenüber dem mechanischen Antrieb bestehen darin, daß er gestattet, die Belastungsgeschwindigkeit schnell in beliebigen Grenzen zu steigern oder zu vermindern, während man beim mechanischen Antrieb, besonders wenn Vorgelege Verwendung finden, meist nur mit ganz bestimmten Geschwindigkeiten arbeiten kann. Man kann ferner mit dem hydraulischen Antrieb bedeutend höhere Kraftleistungen erzielen als mit dem mechanischen und vermag ebenso wie mit dem letzteren die Belastung stoßfrei zu steigern und einzelne Belastungsstufen hochzuhalten, vorausgesetzt, daß die erforderlichen Hilfseinrichtungen (Absperrventile, Kolbendichtungen usw.) zuverlässig wirken, was bei zweckmäßiger Konstruktion leicht zu erreichen ist. Andererseits hat der mechanische Antrieb häufig den Vorzug der konstruktiven Einfachheit, mit ihm ausgerüstete Maschinen sind auch weniger an die Örtlichkeit gebunden, sie sind leichter ortsveränderlich und schließlich auch einfacher in der Wartung und Bedienung.

Der hydraulische Antrieb besteht in der Regel aus einem sogenannten hydraulischen Preßzylinder, d. h. einem zylindrischen Hohlgefäß, in dem ein Kolben möglichst reibungsfrei geführt ist. Auf die untere Kolbenfläche wirkt eine Preßflüssigkeit — Wasser, Öl, Glyzerin, Spiritus —, während die obere aus dem Zylinder heraus-

ragende Kolbenfläche die Kraft direkt oder durch geeignete Übertragungsvorrichtungen an den Probekörper abgibt. Solange kein Kraftschluß in der Maschine besteht, d. h. solange die vom Kolben durch den eingebauten Probekörper übertragene Kraft keine Stütz- oder Reaktionskraft findet, wird der Kolben unter dem Einfluß des in der Preßflüssigkeit vorhandenen Flüssigkeitsdruckes aus dem Zylinder herausgedrückt werden; das setzt natürlich voraus, daß die Preßflüssigkeit immer entsprechend dem Vorgange des Kolbens im Zylinder ergänzt wird, daß also immer ein genügend großer Vorrat von Preßflüssigkeit mit gleichbleibendem Drucke vorhanden ist. Um nun, nachdem der Kraftschluß hergestellt ist, die Kraft so weit steigern zu können, daß unter ihrer Einwirkung die Festigkeit von Probekörpern aus widerstandsfähigem Material überwunden wird, muß die auf die Kolbenflächen wirkende Preßflüssigkeit unter so hohem Drucke stehen, daß Produkt aus Druck der Preßflüssigkeit p in Atmosphären mal Kolbenfläche in Quadratzentimeter eine Belastung P in Kilogramm ergibt, die größer als die Zerreiß-, Druck- usw. -Festigkeit des Probekörpers ist; denn

$$p = \frac{P}{f},$$

also

$$P = p \cdot f.$$

Unter Zugrundelegung eines Normaldruckkörpers (s. S. 69) aus Gußeisen mit etwa 8000 atm. (= 8000 kg/qcm) Festigkeit würde sich die erforderliche Kraftleistung und die Bemessung des Preßwasserdruckes wie folgt errechnen:

$$\sigma = 8000 \text{ atm.},$$

$$P = \sigma \cdot f.$$

Der Druckkörperquerschnitt, wenn $d = 3{,}0$ cm:

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 7{,}07 \text{ qcm} .$$

Die zum Zerdrücken des Körpers nötige Gesamtbelastung:

$$P = 8000 \cdot 7{,}07 = \backsim 57000 \text{ kg} .$$

Steht an der zur Prüfung benutzten Maschine als Krafterzeuger ein Preßzylinder zur Verfügung, dessen Kolbendurchmesser 30 cm und Querschnitt 707 qcm ist, so würde, um den obengenannten Druckkörper zum Bruch bringen zu können, die Preßflüssigkeit im Zylinder unter einem Druck von

$$p = \frac{P}{f} = \frac{57000}{707} = \backsim 80 \text{ atm.}$$

stehen müssen. — Die gebräuchlichsten unserer deutschen Prüfungsmaschinen (z. B. Pohlmeyer-, Martens-, Werdermaschinen usw., s. die Beschr. S. 134) haben im Krafterzeuger solche Kolbenabmessungen, daß man zur Erreichung der Höchstleistung der Maschine mit Preßwasserdrucken von 150—200 atm. auskommt.

Die Wandungen des Preßwasserzylinders der Prüfungsmaschinen müssen daher auch aus genügend festem Material (Stahlguß, Gußeisen) in solchen Abmessungen hergestellt sein, daß sie diesen Flüssigkeitsdrucken ohne bleibende Veränderung widerstehen. Es ist ferner erforderlich, daß die Führung zwischen Kolben uud Zylinderwandung eine so innige und dichte ist, daß an dieser Stelle kein Preßwasserverlust und damit eine Druckverminderung der Preßflüssigkeit stattfindet. Man hat dieser Anforderung durch verschiedenartige Konstruktionen genügt. Nach dem Amagatschen Prinzip wird der Kolben so sauber in die Zylinderbohrung eingeschliffen, daß

keine besondere Dichtung zwischen Zylinder und Kolben mehr nötig ist; dies ist indessen nur dann möglich, wenn es sich um Zylinder mit geringeren Durchmessern handelt und wenn eine Preßflüssigkeit von großer Zähflüssigkeit (Glyzerin oder Öle) Verwendung findet, die nur unter

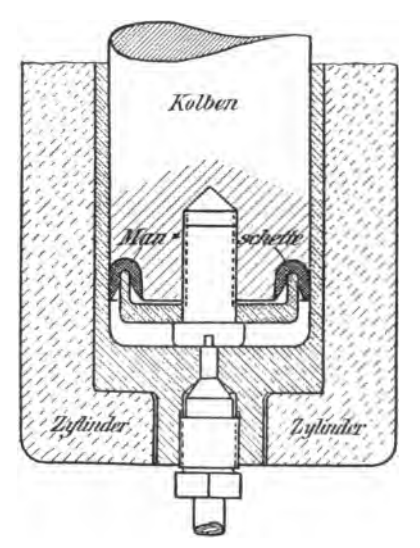


Fig. 43.
Hydraulischer Preßzylinder mit O-Manschette.

großem Druck zwischen Kolben und Zylinderwandung hindurchzupressen ist. In den weitaus meisten Fällen findet indessen Wasser als Preßflüssigkeit Verwendung, dem man höchstens, um Rosten der Leitungen, Zylinder und Kolben hintanzuhalten, geeignete Mittel hinzufügt (z. B. Glyzerin, Hydrol usw.). Auch müssen bei den schwe-

reren Prüfungsmaschinen die Abmessungen der Kolben so groß gewählt werden, daß nicht zu hohe Preßwasserdrucke zur Erreichung der Höchstleistung der Maschine nötig werden, und das bedingt Abmessungen, bei denen das saubere Einschleifen der Kolben nach Amagatschem Prinzip kostspielig und schwierig wird. In solchen Fällen müssen daher besondere Dichtungen zwischen Kolben und Zylinderwandung eingebaut werden. Zu diesem Zwecke findet für hydraulischen Hochdruck die sogenannte Ledermanschette, auch Lederstulp genannt, ausgiebige Verwendung. Ein Lederring wird in geeigneten Vorrichtungen (Manschettenpressen) so gepreßt, daß eine ∪-förmige Querschnittsform entsteht. Die Ränder werden nach dem Pressen zugeschärft und eine solche ∪-Manschette wird dann zwischen Kolben und Zylinderwandungen etwa nach Fig. 43 eingebaut. Unter dem Drucke der Preßflüssigkeit drücken sich die Ränder der Manschette fest an Zylinderwandung und Kolben an und lassen kein Druckwasser hindurchtreten. Für die Herstellung gut wirkender Manschetten ist nicht jedes Leder geeignet. Das Leder muß fest und im trockenen Zustande nicht zu weich und lappig sein, damit es die Formgebung der Manschette gut aushält und die Form beibehält. Es darf indessen auch im nassen Zustande nicht zu hart bleiben, damit die Manschettenschenkel sich mit den sauber zugeschärften Rändern dicht an die Dichtungsflächen anlegen. Gutes Kernleder, dessen Dicke natürlich den Abmessungen der Manschette anzupassen ist, eignet sich für den Zweck besonders. Das sehr feste und dabei sehr elastische Chromleder, das von vielen Maschinenfabriken hierfür verwendet wird, ist für Zylinder von Prüfungsmaschinen, bei denen vollkommenes Dichthalten mehr als beispielsweise bei Pumpenstiefeln usw.

verlangt wird, nicht so geeignet, weil es nach vielfachen Erfahrungen sehr empfindlich gegen Schmierfett oder Öl ist, das man, besonders für die Kolben ohne Metallüberzug, zur Konservierung und zum Rostschutz nicht entbehren kann. — Ledermanschetten haben sich im Königl. Materialprüfungsamte zu Groß-Lichterfelde für sehr hohe Preßwasserdrucke (4000 atm. Prüfung von Gewehrläufen auf inneren Druck) noch sehr gut bewährt.

Die Erzeugung des Druckes in der Preßflüssigkeit geschieht durch Pumpwerke, die entweder von Hand oder durch motorischen Antrieb betätigt werden. In größeren Anlagen, z. B. den öffentlichen Prüfungsstellen, wird man meistens die letztere Antriebsart finden und zudem mit Vorrichtungen, die die Prüfungsmaschinen nahezu gänzlich frei von den nicht zu vermeidenden Pumpenstößen machen. Solche Anstalten haben gewöhnlich gemeinsam für alle aufgestellten Prüfungsmaschinen eine Zentrale, in der die Druckwassererzeugung besorgt wird und von der aus mit Rohrleitungen das Preßwasser nach den einzelnen Verbrauchsstellen geführt wird. Die Zentrale enthält ein Pumpwerk, das Wasser aus einem Reservoir in einen sogenannten Akkumulator, einen Sammler, speist, in dem es unter Druck gesetzt und gehalten wird. Der Akkumulator hat den Zweck, stets eine bestimmte Menge Preßflüssigkeit unter bestimmtem, gleichbleibendem Drucke in Vorrat zu halten, ohne daß es erforderlich ist, daß das Pumpwerk andauernd im Betrieb bleibt. Die Tätigkeit des Pumpwerkes zum Wiederauffüllen des Akkumulators paßt sich vielmehr dem jeweiligen Bedarf an Druckwasser, der natürlich ganz verschieden ausfällt, an; geeignete Vorrichtungen veranlassen also, daß das Pumpwerk erst wieder in Tätigkeit tritt, wenn der Vorrat an Druckwasser im Akkumulator nahezu aufgebraucht

ist. Die Zwischenschaltung des Akkumulators zwischen Pumpwerk und Verbrauchsstelle hat ferner den Vorteil, daß die Prüfungsmaschine im Betriebe nicht andauernd durch die Pumpenstöße, die besonders dann störend sind, wenn sie sich vom Probekörper auf die Lastmeßvorrichtungen übertragen, beeinflußt wird. Das Konstruktionsprinzip eines solchen Akkumulators ist folgendes: In einem Preßzylinder wird die Preßflüssigkeit, die durch das Pumpwerk zugeführt wurde, dadurch unter gleichbleibendem Drucke gehalten, daß auf den Kolben des Zylinders von außen her eine Belastung von entsprechender Größe wirkt. Der Druck dieser Belastung auf die Einheit der Querschnittsfläche (kg/qcm = atm.) des Kolbens muß so groß wie der Druck in Atmosphären sein, unter dem die Preßflüssigkeit stehen soll. Dies erreicht man durch verschiedenartige konstruktive Anordnung. Die Belastung auf den Preßkolben wird entweder durch einen Ballastkasten bewirkt, der mit Beschwerungsmaterial (Schwefeleisen, Roheisenbarren usw.) gefüllt ist und durch die Preßpumpe mit dem Preßkolben zusammen gehoben wird (Gewichtsakkumulator), oder man konstruiert den Preßkolben als Kolbenstange eines Dampfkolbens, auf den in einem Dampfzylinder der Dampfdruck aus einer Kesselanlage mit solcher Spannung wirkt, daß Produkt aus Dampfdruck in Atmosphären mal Fläche des Dampfkolbens in Quadratzentimeter die erforderliche Belastung des Preßkolbens ergeben (Dampfakkumulator). Beide Konstruktionen haben Vorrichtungen, die einerseits das Anhalten des Pumpwerkes veranlassen, sobald der Preßwasserzylinder angefüllt ist, und die andererseits das Pumpwerk wieder in Gang setzen, sobald der Preßwasservorrat im Preßzylinder nahezu verbraucht ist. Diese Steuerung der Pumpe geschieht entweder durch mechanische Vorrich-

tungen, die die Saugventile des Pumpwerkes außer oder in Betrieb setzen, oder es sind, falls der Antrieb des Pumpwerkes durch Elektromotor geschieht, elektrische Hilfsapparate (Kippschalter, automatische Anlasser) eingebaut, die den Stromkreis für den Antriebsmotor entweder unterbrechen oder schließen, je nachdem die Pumpe zum Stillstand kommen oder in Betrieb gesetzt werden soll. Letztere Einrichtung hat den Vorzug, daß die Pumpe tatsächlich nur zeitweise zum Auffüllen des Preßzylinders in Betrieb kommt, während bei der mechanischen Steuerung Motor und Pumpe auch mitlaufen, wenn auch unbelastet, wenn der Zylinder gefüllt ist.

Beide Bauarten der Gewichts- und der Dampfakkumulatoren haben Vorteile und Nachteile. Der Gewichtsakkumulator erfordert großen Raumbedarf, der Ballastkasten nimmt zu ungeschickte Dimensionen an, wenn es sich um Aufspeicherung größerer Mengen Preßwassers von hohem Drucke handelt. Zudem ist selbst, wenn alle denkbaren Vorsichtsmaßregeln getroffen, immer eine gewisse Gefahr mit dem Anheben solcher gewaltiger Gewichtsmassen bis zu mehreren Metern Höhe verbunden. Andererseits arbeitet der Gewichtsakkulumator in bezug auf die Erhaltung gleichbleibenden Druckes erheblich exakter als der Dampfakkumulator, bei dem sich Schwankungen des Druckes oft nicht vermeiden lassen, wenn der Dampfdruck Schwankungen unterworfen ist, ein Umstand, der die Verwendung von Dampfakkumulatoren für den Betrieb von hydraulischen Prüfungsmaschinen, an denen jede Druckschwankung bei genaueren Arbeiten oft sehr störend wird, stark beeinträchtigt. Hat der Dampfakkumulator auch die gefällige Bauart und den meist geringeren Platzbedarf für sich, so bleibt seine Wartung, seine Inbetriebsetzung schon wegen seiner Abhängigkeit vom Dampfkessel für den Betrieb von Prüfungsmaschinen immer umständlich.

Erwähnt sei noch, daß bei manchen Bauarten von Akkumulatoren an Stelle des Dampfdruckes komprimierte Gase (Kohlensäure usw.) Verwendung finden.

Die Weiterleitung der Preßflüssigkeit vom Akkumulator nach den Krafterzeugern der Prüfungsmaschinen geschieht durch **Rohrleitungen** — meist gezogene Stahlrohre oder

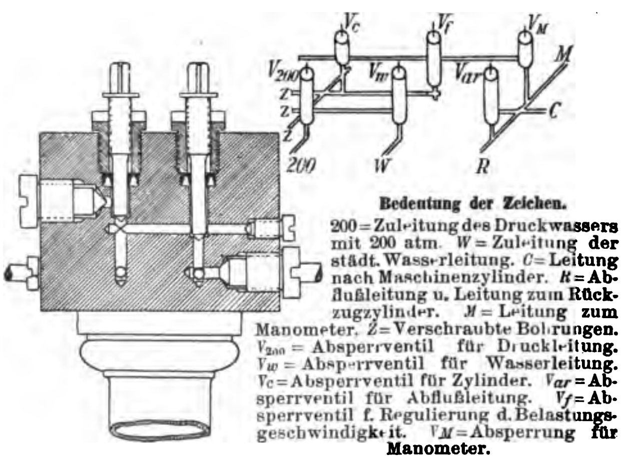


Fig. 44.
Steuerkörper für hydraulische Prüfungsmaschinen nach Martens (Denkschrift S. 283).

Mannesmannrohre —, in die an geeigneten Stellen Ventile zum Entleeren und Entlüften der Leitung, sowie Schlammfänger zum Absondern von Schlamm- oder Rostteilen eingebaut werden. Um die Zuflußgeschwindigkeit des Druckwassers zu den Maschinenzylindern und die Drucksteigerung in der Maschine regeln zu können, werden Steuerkörper vor jeder Maschine angeordnet. Eine

zweckmäßige Konstruktion eines solchen Steuerkörpers nach Angaben von Martens ist der „Denkschrift zur Eröffnung des Königl. Materialprüfungsamtes“ S. 283 entnommen und in Fig. 44 dargestellt. Die der Figur beigegebenen Erläuterungen kennzeichnen die Wirkweise. Die städtische Wasserleitung ist an die Ventile herangeführt, um die Leergangsarbeiten der Maschine, also das Heben und Senken des Preßkolbens bis zum Kraftschluß (s. S. 119), mit Wasserleitungsdruck bewirken zu können.

Über den mechanischen Krafterzeuger ist Besonderes nicht zu bemerken. Seine Hauptbestandteile, bestehend aus Schraube und Schneckenrad, dürften allgemein bekannt sein.

c) Kraftmessung.

Die Kraftmessung an den Prüfungsmaschinen erfolgt entweder mit Hilfe von Wagen oder hydraulisch.

Als Wagen kommen besonders Hebelwagen, Neigungswagen und Federwagen in Betracht.

Die Hebelwagen bestehen in der Regel aus einem ungleicharmigen Wagehebel, der mittels Schneide in einer Pfanne drehbar gelagert ist und an dessen kurzem Hebelarm der Probekörper unter Vermittlung der Einspannvorrichtungen angreift und die Kraft überträgt. Am Ende des anderen, langen Hebelarmes angehängte oder auf eine dort angehängte Wageschale aufgesetzte Gewichte halten dieser Kraft das Gleichgewicht. Die angehängten oder aufgesetzten Gewichte werden hierbei um so vielmal kleiner als die am kurzen Hebelarm angreifende Kraft sein müssen, wie der lange Hebelarm länger als der kurze ist (Übersetzungsverhältnis). Bei einem Hebelübersetzungsverhältnis von 1:500 wird also einer Kraft von 500 kg, angreifend am kurzen Ende des Hebelarms von

der Länge 1, schon mit 1 kg Gewicht am Ende des langen Hebelarmes von der Länge 500 das Gleichgewicht gehalten. Eine Maschine mit ungleicharmigem Wagehebel als Kraftmeßvorrichtung s. in Fig. 48. Vielfach wird der ungleicharmige Wagehebel auch als Winkelhebel gebaut. Mit Winkelhebel als Kraftmesser arbeitet die Werdermaschine (s. Fig. 47).

Bei dieser Art der Hebelwagen bleibt also das Hebelübersetzungsverhältnis konstant und die Gewichte zum Auswägen der Kräfte müssen der Größe der Kraft angepaßt werden. Bei den sogenannten Laufgewichtswagen jedoch wird ein Gewicht von gleichbleibender Größe auf dem langen Hebelarm längs einer Skala verschoben. Es wird im diesem Falle also das Hebelübersetzungsverhältnis entsprechend der Kraftgröße verändert. Mit Laufgewichtswagen sind die Maschinen von Mohr und Federhaff (s. Fig. 50) ausgerüstet.

Die Konstruktion der sogenannten Neigungswagen veranschaulicht die Darstellung der Pohlmeyermaschine in Fig. 49 S. 137. Sie wirken ebenso wie die allgemein bekannten Briefwagen: Im Drehpunkt f des ungleicharmigen Hebels $a\ c$ ist mit Schneide und Pfanne drehbar ein Pendel p gelagert. Die Kraft P greift am kurzen Hebelarm an. Der erfolgende Ausschlag des Pendels, dessen Größe mit geeigneten Vorrichtungen gemessen wird (s. Pohlmeyermaschine Fig. 49), ist proportional der Kraft P.

Die Federwage findet besonders für Maschinen mit kleineren Kraftleistungen Verwendung. Das Maß der Kraft ist hierbei der Federweg, die Längenänderung der Feder. Mit Federwagen arbeiten die Papierzerreißapparate von Hartig-Reusch und Wendler (s. Figur 20 und 21 im 2. Bändchen).

Die hydraulische Kraftmessung geschieht in der einfachsten Form durch Anbringung eines Manometers am Preßzylinder des Krafterzeugers. Der Druck der Preßflüssigkeit, abgelesen in Atmosphären am Manometer, multipliziert mit der Kolbenfläche des Preßkolbens gibt die Kraft, die auf den Probekörper übertragen wird, wobei indessen zu berücksichtigen ist, daß ein Teil der Kraft durch die Überwindung der Reibung der Manschette an der Zylinderwandung aufgebraucht wird; die auf den Probekörper wirkende Kraft ist also um diesen Reibungsbetrag kleiner als das Produkt aus Druck in Atmosphären mal Kolbenfläche. Erfahrungsgemäß ist dieser Reibungsbetrag jedoch nahezu gleichbleibend und meistens kleiner als ein Prozent der Gesamtkraft, weswegen er für die Messungen bei praktischen Versuchen, besonders an den größeren Prüfungsmaschinen, vernachlässigt werden darf, vorausgesetzt, daß man seine Größe einmal festgestellt hat und sie von Zeit zu Zeit nachkontrolliert. Mit hydraulischer Kraftmessung dieser Art arbeiten die Maschinen nach Fig. 52 S. 140 (400 t-Betonpresse nach Martens).

Da das bei dieser Kraftmessung verwendete Meßinstrument, das Manometer, in seinen Anzeigen Veränderungen unterworfen sein kann, so empfiehlt es sich, um diese Veränderungen re htzeitig erkennen zu können, am Zylinder zwei Manometer anzubringen und die Anzeigen beider Manometer immer miteinander zu vergleichen; stimmen die Ablesungen an beiden Manometern nicht mehr überein, so deutet dies auf eine Änderung im Anzeigerwerk des einen oder anderen Manometers hin, was dann Veranlassung zur Nachprüfung der Manometer sein sollte.

Die hydraulische Kraftmessung kann ferner auch durch eine besondere Meßvorrichtung, die sogenannte Meßdose.

erfolgen. Fig. 45 zeigt eine Meßdose nach Martens, die der „Denkschrift" S. 284 entnommen ist. Die Meßdose ist ein zylindrisches Gehäuse *g*, in dem eine Messingblech- oder Gummimembran *m* ausgespannt ist, unter der

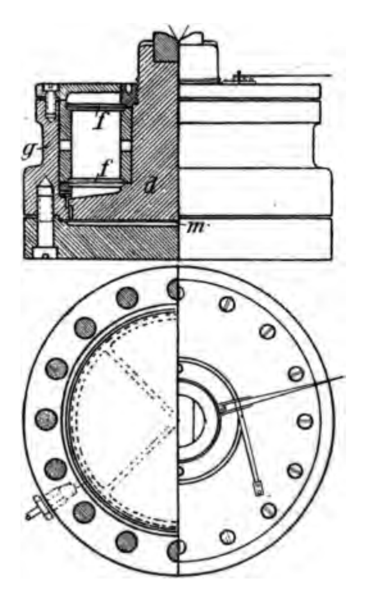


Fig. 45.
Meßdose nach Martens („Denkschrift" S. 284).

sich Wasser befindet. Auf der Membran ruht der Dosendeckel *d*, auf den die vom Probekörper aufgenommene Kraft übertragen wird. Durch den Druck auf den Dosendeckel wird das Wasser unter der Membran unter Druck gesetzt; dieser Druck wird mittels Manometers gemessen,

wobei es sich empfiehlt, die Skala des Manometers nicht nach Atmosphären, sondern nach Kreisgraden aufzutragen und zur Auswertung der Ablesung eine Tabelle zu verwenden, in der die Manometerablesungen nach Kilogrammen umgerechnet sind. Die beiden Stahlbleche f dienen zur Führung des Dosendeckels. Der Deckel selbst arbeitet mit nur geringem Spiel, höchstens 0,2 mm, d. h. seine Auf- und Abwärtsbewegung kann höchstens 0,2 mm betragen. Das Membranblech, aus 0,2 mm dickem Messingblech, hat dieser Bewegung zu folgen, weswegen das Spiel äußerst gering bemessen werden muß, damit das Messingblech nicht an den Auflagerstellen durchgedrückt wird. Erforderlich ist ferner, daß der Druckwasserraum unter der Membran gut luftleer gemacht ist, so daß er ganz mit Wasser angefüllt werden kann. Ist Luft in dem Raume enthalten, so wird diese als elastischer Körper unter der Druckwirkung durch den Dosendeckel elastisch zusammengedrückt; dadurch werden dem Dosendeckel größere Wege gestattet werden, und es liegt die Gefahr nahe, daß der Deckel an seiner Spielbegrenzungsfäche zur Auflage kommt. Die Folge davon wäre, daß die Druckwirkung auf das Membranblech und die Preßflüssigkeit aufhört und das Manometer der Meßdose keine Belastung des Probekörpers mehr anzeigt, während in Wirklichkeit die Kraft vom Probekörper durch den Dosendeckel auf dessen Spielbegrenzungsfläche übertragen wird. Das Deckelspiel wird man daher durch geeignete Vorrichtungen mit unter Beobachtung halten müssen. Die Meßdosen sind; weil sie große praktische Vorteile bieten und einfache Konstruktionen gestatten, bei neueren Maschinenkonstruktionen viel als Kraftmesser verwendet worden. Sie werden sowohl für Druckpressen, als auch für *Zerreiß*maschinen verwendet.

d) Einige Arten von Prüfungsmaschinen.

In den Figuren 46 bis 53 sind eine Anzahl der bekanntesten Arten von Prüfungsmaschinen dargestellt.

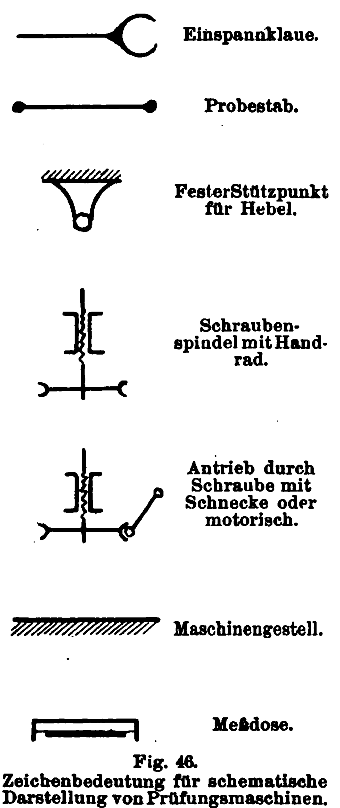


Fig. 46.
Zeichenbedeutung für schematische Darstellung von Prüfungsmaschinen.

Eine Wiedergabe von Abbildungen oder Konstruktionszeichnungen der Maschinentypen würde zu breiten Raum erfordert haben, weswegen für die Darstellung die schematische Zeichnungsweise gewählt ist, die Martens in seiner „Materialienkunde" und in der Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 1886, S. 171 eingeführt hat. Sie ist außerordentlich geeignet, das Wesentliche einer Maschine leicht übersichtlich auszudrücken, und ermöglicht schnelleres Verständnis der Maschinenarten als Abbildungen oder Konstruktionszeichnungen. Fig. 46 veranschaulicht die Bedeutung der angewendeten Zeichen. Eine Anzahl neuerer Maschinenkonstruktionen beschreibt Rudeloff in Dinglers polytechnisches Journal, Jahrgang 1905, S. 375.

Die Maschine nach Fig. 47 ist die Werdermaschine, eine der ältesten, von Werder konstruierten Maschinen liegender Konstruktion, die große Verbreitung gefunden hat, mit großer Genauigkeit der Lastanzeige arbeitet und in ihrer Verwendung sehr vielseitig ist. Ihre höchste Kraftleistung ist 100000 kg. Sie gestattet, Zug-, Druck-, Biege-, Knick-, Scher- und Torsionsversuche anzustellen. Das Maschinenbett ist so eingerichtet, daß Versuchsstücke bis zu 9 m Länge geprüft werden können. Zu dem

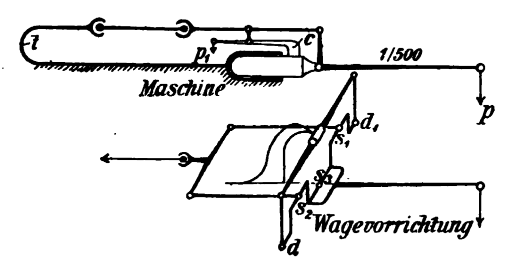


Fig. 47.
Schema der Werdermaschine.

Zwecke kann die Traverse *t* auf dem Maschinenbett je nach der Länge des Versuchsstückes verschoben werden; die Kraftübertragung zwischen dieser Traverse und dem festen Maschinengestelle wird durch eingebaute Zwischenstücke vermittelt. Der Antrieb der Maschine ist hydraulisch. Die Kraftmessung erfolgt durch Hebelwage; der Wagehebel ist als Winkelhebel ausgebildet, der kurze Hebelarm ist 3 mm lang, was dadurch erreicht ist, daß die beiden seitlichen Schneiden S_1 und S_2 um 3 m höher liegen als die mittlere Schneide S_3, die mit den Drehpunkten d d_1 in einer Ebene liegt. Der lange Hebelarm ist 1500 mm lang, das Übersetzungsverhältnis al

1 : 500. Die Maschine ist mit einer Kontrollwage *c* ausgestattet, um das Übersetzungsverhältnis der Hauptwage kontrollieren zu können. Die Gewichte müssen von Hand auf die Wageschale aufgesetzt werden.

Eine stehende Maschine mit 50000 kg höchster Kraftleistung, von Martens konstruiert, zeigt schematisch Fig. 48. Sie ist nur für Zugversuche verwendbar und

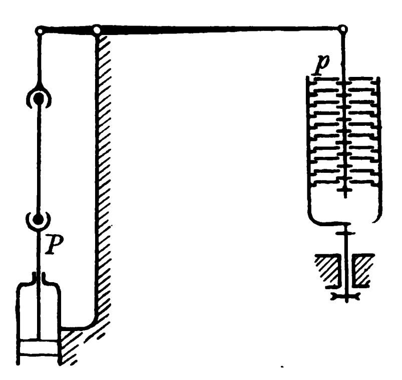


Fig. 48.
Schema der Martensmaschine.

eignet sich ihrer genauen Lastanzeige wegen besonders für Zugversuche mit Feinmessungen. Der Antrieb ist hydraulisch. Die Kraftmessung geschieht durch eine Hebelwage. Das Hebelübersetzungsverhältnis ist 1 : 250. Die Gewichte zum Auswiegen der Kräfte werden in Form von Scheiben (jede im Gewicht von 4 kg) durch besondere Vorrichtung stoßfrei zum Anhängen am Ende des langen Hebelarmes gebracht; die Maschine wird ebenso wie die Werdermaschine von der Maschinenbaugesellschaft Nürnberg gebaut.

Eine besonders für die Versuche der Praxis recht geeignete Maschine, die Pohlmeyermaschine, zeigt Fig. 49. Sie wird für Kraftleistungen von 25000, 50000 und 100000 kg von der Maschinenfabrik Ehrhardt in Zella-St. Blasii gebaut und ist für Ausführung von Zug-, Druck-, Biege-, Scher- und Lochversuchen benutzbar. Der Antrieb

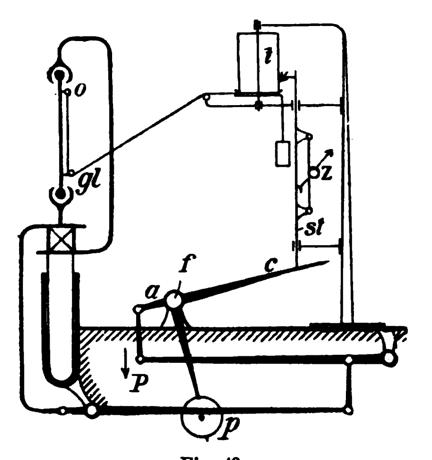


Fig. 49.
Schema der Pohlmeyermaschine.

ist hydraulisch; die Kraftmessung geschieht durch eine Neigungswage. Der Pendelausschlag wird durch eine Übertragungsstange *st*, die auf dem Hebel *a c* gestützt ist, auf ein Zeigerwerk *z* übertragen, an dessen Skala die Belastung bis auf 10 kg abgelesen werden kann. Diese Einrichtung erleichtert die Benutzung der Maschine auch durch weniger geübte Beobachter sehr, weil sich die zu ermittelnden charakteristischen Belastungsstufen (Streck-

grenze, Bruchgrenze, Zerreißgrenze) deutlich durch Stehenbleiben oder Abfallen des Zeigers am Zeigerwerke erkennbar machen. Die Maschine ist zudem mit Schaulinienzeichner nach Konstruktionsangaben von **Martens** ausgerüstet. Die Belastungen werden durch den an der Übertragungsstange *st* befestigten Schreibstift auf der Trommel *t* als Ordinaten aufgetragen; die Trommel wird durch Schnurzug, der über eine Gleitrolle *gl* zur oberen am Probestabe

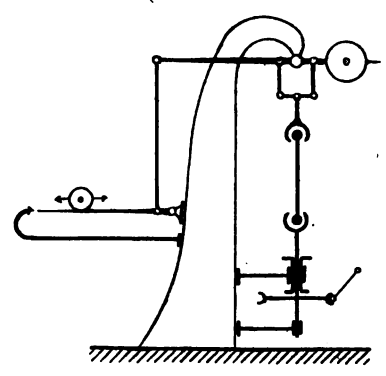


Fig. 50.
Schema der Maschine von Mohr & Federhaff.

angebrachten Öse *o* geführt und dort befestigt ist, entsprechend der Längenänderung, die der Probekörper erfährt, gedreht, so daß in dem aufgezeichneten Schaubild die Formänderungen des Versuchskörpers als Abszissen aufgetragen werden.

Eine größere Maschine mit mechanischem Antrieb und Messung der Belastung durch Laufgewichtswage zeigt Fig. 50. Sie ist von **Mohr & Federhaff** in Mannheim erbaut und viel in der Praxis, besonders für Zerreiß-

versuche mit Metallen usw., in Benutzung. Sie wird in verschiedenen Größen gebaut und ist für gewöhnlich mit mechanischem Antrieb, der durch Vorgelege und motorischen Antrieb betätigt wird, ausgerüstet. Die Firma baut die gleichen Maschinen auch für Druck- und Biegeversuche.

Viel Verwendung in der Baumaterialprüfung finden zur Ausführung von Druckversuchen die Pressen von

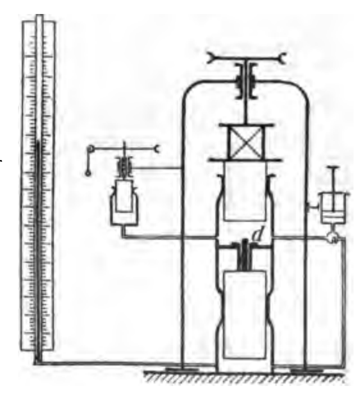


Fig. 51.
Schema der Druckpresse von Amsler-Laffon.

Amsler-Laffon (Fig. 51). Der Antrieb ist auch bei ihnen hydraulisch, die Kraftmessung jedoch hydrostatisch. Der hydraulische Antrieb, bei dem Rizinusöl als Preßflüssigkeit benutzt wird und der mit eingeschliffenen Kolben nach Amagatschem Prinzip arbeitet, wird von Hand mittels Schneckenrades betätigt. Durch Druckreduktionskolben *d* wird der im Preßzylinder erzeugte Druck so reduziert, daß die Messung an einem Quecksilber-

manometer erfolgen kann. Die Skala des Manometers gibt die Belastungen in Kilogramm und in Kilogramm/Quadratzentimeter für den Normaldruckkörper (Würfel von 7,1 cm Kantenlänge) an.

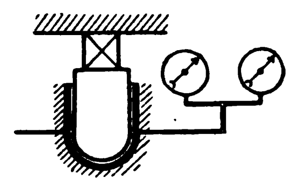


Fig. 52.
Schema der 400 t Betonpresse nach Martens.

Zwei andere Maschinen, gleichfalls mit hydraulischem Antrieb und hydraulischer Kraftmessung, zeigen die Fig. 52 und 53. Nach dem Schema Fig. 52 ist eine Betondruckpresse für 400 t Kraftleistung, von Martens konstruiert, äußerst gedrungen gebaut und zur Verwendung auf dem Bauplatz auf fahrbarem Untergestell von der Nürnberger Maschinenfabrik erbaut. Der Antrieb geschieht durch eine Handpumpe, die Kraftmessung durch zwei am Preßzylinder angeschlossene Hydraulikmanometer. Die Maschine nach Fig. 53 ist nach Konstruktionsangaben von Martens für die Ausführung von Dauerversuchen im Königl. Materialprüfungsamt von A. Borsig gebaut, für Zug- und Druckversuche benutzbar und mißt die Kräfte mit einer Meßdose m.

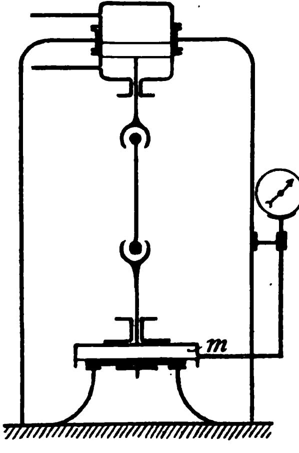


Fig. 53.
Maschine für Dauerversuche nach Martens.

Aus der Fülle anderer Konstruktionen seien hier noch erwähnt die Maschinen von Gravenstaden und Gollner und von ausländischen, besonders englischen und amerikanischen Maschinen, die Konstruktionen von Kirkaldy, Sellers, Tinius Olsen, Riehlé Bros., Emery. Eine Reihe von Spezialmaschinen für die Festigkeitsversuche mit Papier und Bindemitteln sind im 2. Bändchen beschrieben.

2. Die Meßwerkzeuge.

a) Allgemeines.

Unter den Meßwerkzeugen kommen erstens solche in Betracht, mit denen die Abmessungen der Probekörper vor und nach dem Versuch festgestellt werden, und zweitens solche, die zur Ermittlung der Formänderungen während des Versuchs dienen.

Die ersteren können Strich- oder Endmaße sein. Strichmaße sind die Maßstäbe mit Millimeter- und Zentimetereinteilung; die Endmaße sind Schublehren und Schraubenlehren, auch Mikrometerschrauben genannt. Beide Arten dürften hinlänglich bekannt sein, so daß ihre Beschreibung sich an dieser Stelle erübrigt. Größeres Interesse erfordern die Meßwerkzeuge zur Bestimmung der Formänderungen während des Versuchs. Sie können dazu dienen, nur die größeren Formänderungen oberhalb der Fließgrenze (s. S. 17) des Materials zu messen, und dementsprechend grobe Werkzeuge sein, oder sie müssen zur Ermittlung der sehr kleinen elastischen Formänderungen innerhalb der Elastizitäts- oder Proportionalitätsgrenze (s. S. 16) benutzt werden und dann außerordentlich empfindlich und sehr genau und sauber gearbeitet sein.

b) Grobmeßapparate.

Für die Messung der größeren Formänderungen werden Anlegemaßstäbe verwendet, die beim Zerreißversuch mit Federklemmen am Probestab befestigt werden. Einen solchen Anlegemaßstab in einfachster Form, wie ihn sich jeder leicht selbst herstellen kann, zeigt Fig. 54. An der kleinen Holzleiste *h* ist ein Stück Papiermaßstab mit Millimeterteilung aufgeleimt, während bei *s* eine Holzschraube eingeschraubt ist, deren Kopf schneidenförmig zugefeilt ist. Die so gebildete Schneide wird in die Marke am Stabe eingesetzt, die die Meßlänge (s. S. 33) am oberen Ende begrenzt, während die Nullmarke der Teilung am Papiermaßstabe sich mit der unteren Begrenzungsmarke für die Meßlänge deckt. Dehnt der Stab sich innerhalb der Meßlänge, so ist diese Dehnung an der jeweiligen Stellung der Endmarke der Meßlänge zur Millimeterteilung auf dem Papiermaßstab abzulesen, wobei man $^1/_{10}$ mm noch genau schätzen kann. Zur Errechnung von $\varepsilon = \frac{\lambda}{l}$ (s. S. 26) muß man die abgelesene Dehnung noch durch die Meßlänge dividieren. Diese Rechnung ersparen die sogenannten Prozentmaßstäbe, die ebenfalls Anlegemaßstäbe sind, aber eine Teilung haben, die nach

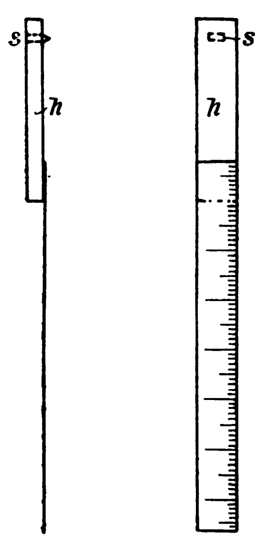


Fig. 54.
Anlegemaßstab.

Prozenten der Meßlänge ausgeführt ist. Bei einer Meßlänge von 150 mm sind bei diesen Maßstäben die einzelnen Teilungsintervalle in Abständen von 1,5 mm voneinander aufgetragen. Der hundertste Teil des abgelesenen λ ist also in diesem Falle gleich ε.

c) Feinmeßapparate.

Für die Messung der elastischen Formänderungen werden Feinmeßinstrumente verwendet. Eine große Anzahl von Konstruktionen sind auch hier, wie bei den Prüfungsmaschinen, zu verzeichnen; die meiste Verbreitung haben indessen die sogenannten Spiegelapparate gefunden, wenn man überhaupt von Verbreituug reden kann. Die Messung der elastischen Formänderungen wird nämlich in der Hauptsache nur an den öffentlichen Prüfungsstellen und in einigen größeren Festigkeitslaboratorien großer Firmen der Eisenindustrie ausgeführt werden, schon weil sie einige Übung erfordert und auch die Durchführung des Versuches langwieriger gestaltet. In der Praxis wird man sich meistens mit der Ausführung des einfachen Zugversuches ohne Messungen während des Versuches begnügen.

Die Idee, die sogenannte Gaußsche Spiegelablesung für die Materialprüfung zu verwenden, rührt von Bauschinger her, der zuerst einen solchen Apparat für die Versuche mit Feinmessungen an der Werdermaschine konstruiert hat. Der Apparat, der außerordentlich genau arbeitet, hat sich indessen für die Verwendung an anderen, besonders den Maschinen stehender Konstruktion als unhandlich erwiesen. Aus diesem Grunde hat Martens seinen sehr zweckmäßig eingerichteten und leicht zu handhabenden Spiegelapparat nach dem gleichen Prinzip konstruiert. Fig. 55 (der „Denkschrift“ S. 32

entnommen) veranschaulicht die Einzelteile des Apparates. Der schneidenförmige Stahlkörper *s* von rhombischem Querschnitt, bei dessen Herstellung besonders auf peinlichste Sauberkeit und Parallelität der Schneidenkanten zu achten ist, trägt in seiner Verlängerung in einer Achse *a* drehbar einen Planspiegel *sp*, der um seine Horizontalachse drehbar ist und mit Hilfe der kleinen

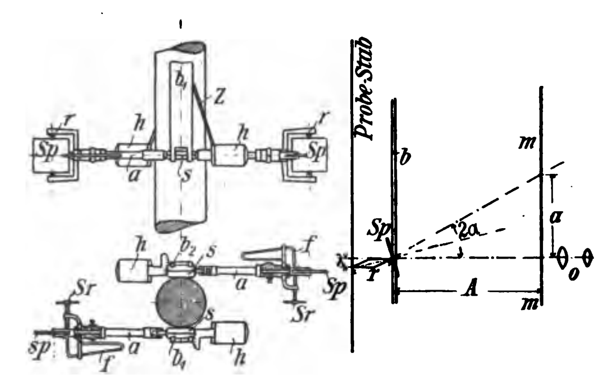


Fig. 55.
Spiegelapparat nach Martens („Denkschrift" S. 324).

Schraube *sr* auch um seine Vertikalachse gedreht werden kann, wobei die Drehung in Spitzen erfolgt, die in die Fassung *r* eingelassen sind und in Körnermarken des Spiegels eingreifen. Für die Rückwärtsbewegung des Spiegels beim Zurückschrauben der Schraube *sr* sorgt die Feder *f*. Unter Vermittlung zweier Blattfedern b_1, b_2 und einer Federklemme werden zwei solcher Spiegelapparate mit ihren Schneidenkörpern, wie Fig. 55 zeigt, an zwei gegenüberliegenden Längsfasern am Stabe angesetzt. Die Blattfedern *b* haben am oberen Ende eine

Schneide, die in eine am Stabe zur Begrenzung der Federlänge (d. h. derjenigen Länge, auf die die elastischen Formänderungen gemessen werden sollen) eingeritzte Ringmarke eingesetzt wird. Am unteren Ende der Blattfeder ist eine Nute eingearbeitet, die die Meßlänge, auch Federlänge (s. S. 32) genannt, nach unten hin begrenzt. Bei den Apparaten neuerer Konstruktion erübrigt sich die Anbringung einer Ringmarke am Stabe gegenüber den Nuten der Meßfedern, weil mit den am Handgriff h angebrachten Zeigern z die Lage der Schneidenachse zur Längsachse des Versuchsstabes richtiggestellt werden kann. Am oberen Ende der Federlänge, wo die Schneiden der Meßfedern am Stabe angesetzt werden, empfiehlt sich indessen die Anbringung einer solchen Ringmarke am Stabe, schon damit die beiden Meßfedern in gleicher Höhe am Stabe angesetzt werden; indessen ist der Apparat auch ohne diese Ringmarken bei einiger Übung bequem zu handhaben.

Die Wirkweise des Apparates ist folgende: Erfährt der Stab eine Längenänderung innerhalb der Federlänge, so wird eine drehende Bewegung der Spiegelschneide, also auch des Spiegels erfolgen, deren Größe mit Hilfe des Fernrohres o aus der Verschiebung des Spiegelbildes der Skala m gegen das Fadenkreuz des Fernrohres abgelesen werden kann.

Das Übersetzungsverhältnis des Apparates ergibt sich aus nachstehenden Beziehungen. Die Dehnung λ des Stabes (s. Fig. 55) ist $\lambda = r \sin \alpha$, worin r die Breite des Schneidenkörpers, α den vom Spiegel durchlaufenen Winkel bedeutet. Die Ablesung a an der Skala ist, weil der Lichtstrahl wegen der Spiegelwirkung den Winkel $2\,\alpha$ durchläuft (das Spiegelbild der Skala erscheint im Spiegel um ebensoviel hinter dem Spiegel liegend, als die Skala vom

Spiegel entfernt ist), $a = A \operatorname{tang} 2\alpha$, worin A den Abstand der Skala von den Spiegeln bedeutet. Das Übersetzungsverhältnis ist also:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r \sin \alpha}{A \operatorname{tang} 2\alpha}.$$

Da Winkel α immer nur sehr klein ist, so kann gesetzt werden:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r}{2A}.$$

Macht man also, wie es für gewöhnlich geschieht, die Schneidenbreite $r = 4$ mm, den Abstand $A = 1000$ mm, so ergibt sich ein Übersetzungsverhältnis von 1 : 500; d. h. eine Zunahme der Ablesung an der Skala um 1 mm bedeutet $^1/_{500}$ mm Dehnung des Stabes. Da nun die Fernrohre die Intervalle zwischen den Millimeterstrichen der Skala vergrößert erscheinen lassen, so kann man, besonders bei einiger Übung, mit großer Genauigkeit die $^1/_{10}$ mm schätzen, so daß dann die Formänderung des Stabes in $^1/_{5000}$ mm abgelesen wird. Man kann diese Meßgenauigkeit natürlich noch erhöhen, wenn man den Skalenabstand entsprechend vergrößert. Bis zu $^1/_{20000}$ mm sind diese Messungen bereits vielfach vorgenommen worden. Mit schärferen Fernrohrlinsen lassen sich natürlich noch größere Übersetzungen anwenden. Die Messung mit zwei Spiegelapparaten an zwei gegenüberliegenden Längsfasern des Stabes hat den Vorzug, daß man λ als Mittelwert beider Ablesungen angeben kann und ferner den Einfluß aller etwa eintretender Bewegungen des Stabes im Raum auf das Meßergebnis ausschließt. Bewegung des Stabes im Raum wird immer die Ablesung von einem Spiegelapparate um so viel ver-

größern, als sie am anderen verkleinert wird; eine Zunahme der Ablesung, als Mittelwert beider Ablesungen errechnet, wird also in diesem Falle, wenn keine wirkliche Stabdehnung erfolgt ist, nicht zu verzeichnen sein. Würde man nur mit einem Spiegelapparate arbeiten, so würden diese Bewegungen im Raum das Meßergebnis fehlerhaft beeinflussen.

Beim Ansetzen der Spiegelschneiden an den Probestab ist darauf zu achten, daß die Horizontalachse der Spiegelschneide keinen zu großen Winkel gegen die senkrechte Achse des Stabes bildet, denn schon, wenn die horizontale Schneidenachse um 5^0 gegen die Stablängsachse geneigt ist, wird der Fehler der Messung bereits über ein Prozent. An den Spiegelapparaten neuerer Konstruktion ist daher ein Zeiger z senkrecht zur Horizontalachse des Schneidenkörpers (s. Fig. 55) angebracht, der beim Ansetzen des Spiegelapparates auf eine Marke an der Meßfeder einspielen muß, wenn die Schneide die richtige Anfangsstellung hat. — Die auf den ersten Blick etwas umständlich erscheinende Handhabung des ganzen Apparates ist bei einiger Übung außerordentlich einfach. Ein einigermaßen geübter Beobachter wird in längstens 10 Minuten den ganzen Apparat fertig angesetzt und eingestellt haben. Die Reihenfolge der Handhabungen ist zweckmäßig die folgende:

1. Einlegen des Probestabes in die Maschine,
2. Ansetzen der beiden Meßfedern — Anbringen der Federklemmen — Einsetzen der Spiegelapparate — Ausrichten des Apparates,
3. Einstellen der Fernrohre so, daß Fadenkreuz auf Mitte der Spiegel steht,
4. Ansetzen der Skalen,
5. Drehen des Stabes so, daß Spiegelbilder der Skalen seitlich gleichweit von den zugehörigen Fernrohrachsen erscheinen,

Rollenapparat. Er besteht aus einer in Spitzen gelagerten Hartgummirolle *r*, die einen Zeiger *z* trägt, der an der Bogenskala *S* abläuft. Die Übertragungsstange *st* ist mit Klemmschraube an demjenigen Punkte befestigt, dessen Bewegung infolge von Formänderung gemessen werden soll; *st* überträgt diese Bewegung dadurch, daß sie mit ihrem anderen Ende tangential am Rollenumfange des Apparates angreift, also das Vorgehen des Zeigers *z* längs der Bogenskala entsprechend der Bewegung des Meßpunktes und dem Übersetzungsverhältnis des Apparates bewirkt. Dieses Übersetzungsverhältnis ist, je nachdem die Übertragung an der Rolle mit dem größeren oder kleineren Durchmesser angreift, 1 : 20 oder 1 : 50. An der Millimeterteilung der Bogenskala können also entweder $^1/_{200}$ oder $^1/_{500}$ mm abgelesen werden. Für die Messungen beim Biegeversuch sind, um die Durchbiegung in der neutralen Linie (S. 74) zu messen, drei solcher Apparate, wie Fig. 31 zeigt, angeordnet. Die Apparate arbeiten außerordentlich genau, so daß die Größe der elastischen Formänderung und die Proportionalitätsgrenze scharf ermittelt werden können.

Martens hat dies Prinzip der Rollenapparate für die Konstruktion seiner Tellerapparate benutzt. Bei ihnen läuft der Zeiger, der an einer in Spitzen gelagerten Stahlachse (Durchm. = 2—3 mm) befestigt ist, auf einer mit Skala versehenen kreisrunden Scheibe ab, die wie die Skala eines Manometers im Metallgehäuse und mit Glasscheibe gedeckt gelagert ist. Die Betätigung geschieht meist durch einen Schnurzug, der um die Achse geschlungen ist und dessen eines Ende im Meßpunkt am Probekörper befestigt ist, während am anderen Ende ein angehängtes Gewicht die Schnur dauernd gespannt erhält. Die Apparate finden besonders, weil sie leicht überall angebracht

werden können, bei den Belastungsproben mit Deckenkonstruktionen, Balken und Säulen usw., wo die erfolgenden elastischen Formänderungen ermittelt werden sollen, Verwendung.

Aus der großen Anzahl weiterer Feinmeßapparate sei hier noch der sogenannte Fühlhebelapparat von Bauschinger für die Messung der elastischen Formänderungen beim Knickversuch (S. 70) erwähnt. Seine Bauart setzt jedoch die horizontale Lage des Probekörpers beim Versuch voraus. Seine Einzelteile sind für die Verwendung an der Werdermaschine (S. 135) gebaut. Konstruktion und Wirkweise wird aus der schematischen Darstellung in Fig. 58 klar werden. Er zeigt an der Bogenskala M die Bewegung des Meßpunktes am Probekörper in der Horizontalebene, an der Bogenskala M_1 diejenigen in der Vertikalebene mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:10 an. Beide Skalen sind an einem Stativ befestigt, das am Bett der Werdermaschine angeschraubt wird. Zur Messung der Ausknickungen in der neutralen Linie der Probe (S. 74) sind wiederum drei solcher Apparate, je einer an den beiden Enden, der dritte in der Mitte des Probekörpers, angebracht.

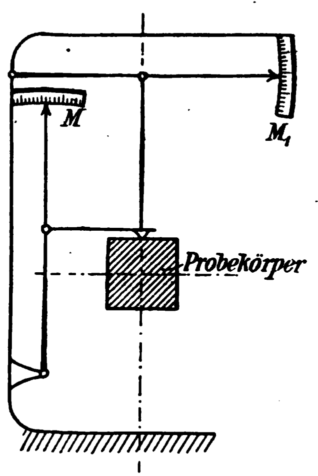


Fig. 58.
Schema des Fühlhebelapparates nach Bauschinger.

3. Kontrolle und Eichung der Hilfsmittel.

Wenn die bei der Materialprüfung benutzten Hilfsmittel einwandfreie und zuverlässige Ergebnisse liefern sollen, ist es immer erforderlich, daß der sie benutzende Beobachter sich klar ist über die in ihnen steckenden Fehlerquellen, über die Größe der ihnen etwa anhaftenden Fehler und über die Art und Weise, wie deren Größe auf das geringste Maß beschränkt werden kann. Die in den vorigen Abschnitten geschilderten Maschinen und Meßapparate sind sämtlich mehr oder weniger komplizierte Apparate, deren Einzelteile genauer Bearbeitung, sorgfältigsten Einbaues usw. bedürfen, wenn das Ganze richtig wirken soll. Daß ein solcher Mechanismus, der meistens doch aus Materialien hergestellt werden muß, die der Veränderung durch mechanische Einflüsse, durch Abnutzung usw. unterworfen sind, von vornherein nicht immer als Präzisionsinstrument betrachtet werden kann, oder wenn er dies im Anfang wirklich sein sollte, nicht dauernd ein Instrument ist, dessen Angaben blindlings als richtig anzusehen sind, das sollte eigentlich kaum erwähnt zu werden brauchen und jedem, der mit solchen Apparaten zu tun bekommt, von vornherein selbstverständlich sein; daß dem nicht so ist, dafür könnten mannigfache Beweise angeführt werden. Wie oft begegnet man Aufzeichnungen über Messungsergebnisse, selbst von technisch gebildeten Beobachtern herrührend, die die Zahlengrößen bis auf Dezimalstellen angeben, von denen der Konstukteur des verwendeten Meßapparates sich niemals hat träumen lassen, daß sie mit seinem Meßapparat gewonnen werden konnten; nicht selten haben öffentliche Prüfungsstellen bei der Untersuchung von Prüfungsmaschinen in der Praxis Fehler bis zu 18% in der Lastanzeige gefunden, obgleich die Meßergebnisse der betreffenden Prüfungsmaschine zahl-

reichen Abnahmeversuchen zugrunde gelegt wurden. Daher sei oberster Grundsatz beim Gebrauch der Meßapparate in der Materialprüfung: „Man ergründe durch Vergegenwärtigung der Wirkweise des Apparates seine Fehlerquellen, suche die Größe der Fehler festzustellen und erwäge, inwieweit diese Fehler bei der Auswertung des Meßergebnisses Berücksichtigung zu finden haben.“ Allgemein zutreffende Anweisungen lassen sich hierfür nicht geben. Für die Apparate zur Messung der Formänderungen wird man in vielen Fällen sich mit der Überzeugung, daß der dem Meßapparate anhaftende Fehler der Anzeige ein nur wenig veränderlicher ist, zufrieden geben können, vorausgesetzt, daß man diese Überzeugung durch häufiger wiederholte Prüfungen des Apparates gefestigt hat. Diese Meßwerkzeuge finden ja, wie aus den vorhergehenden Abschnitten hervorgeht, vielfach nur als sehr empfindliche Anzeiger, zur möglichst genauen Ermittlung charakteristischer Formänderungsgrenzen, Verwendung. Wenn es sich z. B. darum handelt, die Proportionalitätsgrenze mit Hilfe der elastischen Formänderungen eines Materials zu ermitteln, wird es für diese Messung ziemlich gleichgültig sein, ob die Maßeinheit des verwendeten Spiegelapparates wirklich, wie angegeben, $^1/_{10\,000}$ mm oder ob sie vielleicht $^1/_{9998}$ mm ist, wenn man nur die Sicherheit hat, daß der betreffende Spiegelapparat immer nahezu mit dem gleichen Vergleichsmaßstab arbeitet. Kommt es auf Messung in absoluten Zahlen an, so wird die Kunst des sachverständigen Beobachters darin bestehen müssen, die Fehler seines Meßapparates in zweckentsprechender Form zu berücksichtigen. Für die Prüfungsmaschinen wird man, je nach der Gleichförmigkeit des mit ihnen zu prüfenden Materiales, bestimmte zulässige Fehlergrenzen festsetzen und durch häufigere

Prüfung der Lastanzeige ermitteln müssen, wie groß deren Fehler sind. Für Maschinen, mit denen Maschinenbau- und Konstruktionsmaterialien sowie Materialien mit ähnlichem Gleichförmigkeitsgrade geprüft werden, wird nach Martens („Materialienkunde" S. 434) ein Fehler der Anzeige bis zu $\pm 1\%$ immer zulässig sein; für Pressen zum Prüfen von Baumaterialien, Gesteinen, Bindemitteln usw. wird man Fehler bis zu $\pm 2{,}5\%$ zulassen können. Größere Genauigkeit bei den Maschinen anzustreben, ist nicht unmöglich, aber in Ansehung der Ungleichförmigkeit unserer Materialien zwecklos.

Zur Prüfung der Lastanzeigen der Maschinen haben verschiedene Konstrukteure (z. B. Pohlmeyer, Werder) an ihren Maschinen Kontrollwagen angebracht, die aber indessen nicht die gewünschte Genauigkeit der Kontrolle gewährleisten. Vom Königl. Materialprüfungsamte ist hierfür ein Verfahren, das von Bauschinger herrührt, vervollkommnet worden, das in neuerer Zeit vielfache Anerkennung und Anwendung gefunden hat. Es beruht auf der Verwendung sogenannter Kontrollstäbe oder Kontrolldruckkörper. Aus einem Material mit ausgesprochener Proportionalität (S. 16) und hoher Proportionalitätsgrenze (S. 48), etwa 20 kg/qmm (also einem guten Stahl, z. B. Federstahl), wird ein Rundstab oder Druckkörper in solchen Querschnittsabmessungen hergestellt, daß er die durch die Höchstleistung der Prüfungsmaschine gegebene höchste Belastung zu tragen vermag, ohne daß seine Proportionalitätsgrenze überschritten wird, also ohne daß seine elastischen Eigenschaften durch diese Belastung eine Änderung erfahren. Dieser Kontrollprobekörper wird geeicht, d. h. es werden mit Hilfe genau arbeitender Spiegelapparate seine elastischen Formänderungen für eine bestimmte Spannungsstufe ermittelt, wobei natürlich

der schließlich als sogenannter Sollwert, d. h. als Sollformänderung für eine bestimmte Belastungsstufe, angegebene Wert das Mittel einer großen Zahl von Beobachtungen bei der Eichung darstellt. Wird ein so geeichter Kontrollkörper nun in die zu prüfende Maschine eingebaut und die der Eichung zugrunde gelegene Belastung des Stabes mit Hilfe des Lastanzeigers der betreffenden Maschine wiederhergestellt, so muß als Formänderung der bei der Eichung gefundene Sollwert auch in der Prüfungsmaschine gefunden werden, wenn der Lastanzeiger dieser Maschine richtig ist. Abweichungen von diesem Sollwert geben ohne weiteres den Fehler der Maschine. Man wird nun die Prüfung der Maschine nicht darauf beschränken, daß man nur die zum Sollwert gehörige Belastungsstufe einstellt, sondern wird vielmehr deren Vielfache nacheinander am Lastanzeiger einstellen und aus dem Verlauf der erfolgenden Formänderungen den Fehler der betreffenden Maschine bei verschiedenen Belastungsstufen ermitteln. An einer 100 Tonnen-Maschine wird man einen Kontrollstab verwenden, für den der Sollwert für 10 Tonnen angegeben ist. Man wird bei der Prüfung der Maschine die Formänderung für 10, 20, 30, 40 usf. bis 100 ablesen, die ja bei richtiger Lastanzeige immer das betreffende Vielfache des Sollwertes ergeben muß. Der Fehler der Maschinen pflegt nämlich durchaus nicht immer konstant für ihren ganzen Belastungsbereich zu sein; er nimmt häufig nach ganz bestimmten Gesetzen von der Null- bis zur Höchstbelastung zu oder ab. Aus der graphischen Auftragung dieses Fehlerverlaufes lassen sich oft, ebenso wie aus dem Indikatordiagramm beim Indizieren der Dampfmaschine, wichtige Schlüsse über die Wirkweise der einzelnen Teile des Lastanzeigers ziehen.

Die Eichung eines solchen Kontrollkörpers setzt

neben der Verwendung eines zuverlässig arbeitenden Spiegelapparates (S. 143) auch eine Belastungsvorrichtung mit richtiger Lastmessung voraus. Im Materialprüfungsamte wird hierzu der sogenannte Kontrollstabprüfer nach Martens-Hoppe verwendet (Abbildung s. Denkschrift zur Eröffnung des Amtes S. 290). An den Kontrollstab können in dieser Maschine 10 geeichte Gewichtsscheiben von je 1000 kg Gewicht unter Vermittlung eines hydraulischen Zylinders, dessen Kolben die Gewichtsstücke trägt, nacheinander angehängt werden. Die Stäbe können also mit diesem Apparat bis zu 10 Tonnen Belastung geeicht werden. Die weitere Belastung solcher Kontrollstäbe, die Belastungen von über 10 Tonnen ausgesetzt werden sollen, bezweckt nur die Feststellung, ob bis zur Höchstbelastung Proportionalität vorhanden ist, und geschieht in gut justierten Prüfungsmaschinen. Das Materialprüfungsamt gibt solche geeichte Kontrollkörper für niedrige und hohe Belastungsgrenzen an Interessenten ab, die sich ihre Maschinen dann selbst mit diesen Kontrollkörpern nachprüfen können. Das Amt besitzt selbst für die Kontrolle der eigenen Maschinen Stäbe und Druckkörper für 5, 10, 50, 100 und 500 Tonnen Maximalbelastuug.

Andere Kontrollverfahren für die Maschinenprüfung, z. B. den Einbau geeichter Meßdosen nach Martens oder die Kontrolle durch Messung der elastischen Formänderungen der Maschinenteile (Fremont), haben allgemeinere Verbreitung noch nicht gefunden. Das Verfahren des Materialprüfungsamtes ist wohl als einwandfreies zu bezeichnen, erfordert indessen kostspielige Hilfsmittel (Spiegelapparate mit Zubehör etwa 600 Mark, Kontrollstab je nach Belastungsgrenze 150—200 Mark) und auch einigermaßen geübte Beobachter. Die Angabe eines einfachen sicheren Kontrollverfahrens bleibt daher noch wünschenswert.

Alphabetisches Register.

Zahlen bedeuten die Seitenzahlen.

Anorganische Chemische Industrie von Dr. Gust. Rauter in Charlottenburg. II: Salinenwesen, Kalisalze, Düngerindustrie und Verwandtes. Mit 6 Tafeln. Nr. 206.

— — III: Anorganische Chemische Präparate. Mit 6 Tafeln. Nr. 207.

Die Teerfarbstoffe mit besonderer Berücksichtigung der synthetischen Methoden von Dr. Hans Bucherer, Professor an der Königl. Techn. Hochschule Dresden. Nr. 214.

Die Industrie der Silikate, der künstlichen Bausteine und des Mörtels von Dr. Gust. Rauter. I: Glas- und keramische Industrie. Mit 12 Tafeln. Nr. 233.

— — II: Die Industrie der künstlichen Bausteine und des Mörtels. Mit 12 Tafeln. Nr. 234.

Das Wasser und seine Verwendung in Industrie und Gewerbe von Dr. Ernst Leher, Dipl.-Ingen. in Saalfeld. Mit 15 Abbildungen. Nr. 261.

Metallurgie von Dr. Aug. Geitz. 2 Teile. Mit 21 Fig. Nr. 313 und 314.

Brauereiwesen I: Mälzerei von Dr. Paul Dreverhoff, Direktor der Brauer- und Mälzerschule in Grimma Mit 16 Abbildungen. Nr. 303.

G. J. Göschen'sche Verlagshandlung in Leipzig.

Feldgeschütz, Das moderne, von W. Heydenreich, Oberstleutnant u. Militärlehrer an der Militärtechnischen Akademie. II: Die Entwicklung des heutigen Feldgeschützes auf Grund der Erfindung des rauchlosen Pulvers, etwa 1890 bis zur Gegenwart. Mit 11 Abbildungen. Nr. 307.

Fernsprechwesen, Das, von Dr. Ludwig Rellstab in Berlin. Mit 47 Figuren und 1 Tafel. Nr. 155.

Festigkeitslehre von W. Hauber, Diplom-Ingenieur. Mit zahlreichen Figuren. Nr. 288.

Filzfabrikation. Textil-Industrie II: Weberei, Wirkerei, Posamentiererei, Spitzen- und Gardinenfabrikation und Filzfabrikation von Prof. Max Gürtler, Direktor der Königl. Techn. Zentralstelle für Textil-Industrie zu Berlin. Mit 27 Fig. Nr. 185.

Finanzwissenschaft v. Präsident Dr. R. van der Borght in Berlin. Nr. 148.

Fischerei und Fischzucht v. Dr. Karl Eckstein, Prof. an der Forstakademie Eberswalde, Abteilungsdirigent bei der Hauptstation des forstlichen Versuchswesens. Nr. 159.

Formelsammlung, Mathemat., u. Repetitorium d. Mathematik, enth. die wichtigsten Formeln und Lehrsätze d. Arithmetik, Algebra, algebraischen Analysis, ebenen Geometrie, Stereometrie, ebenen u. sphärischen Trigonometrie, math. Geographie, analyt. Geometrie d. Ebene u. d. Raumes, d. Different.- u. Integralrechn. v. O. Th. Bürklen, Prof. am Kgl. Realgymn. in Schw.-Gmünd. Mit 18 Fig. Nr. 51.

— **Physikalische,** von G. Mahler, Prof. am Gymnasium in Ulm. Nr. 136.

Forstwissenschaft von Dr. Ad. Schwappach, Professor an der Forstakademie Eberswalde, Abteilungsdirigent bei der Hauptstation des forstlichen Versuchswesens. Nr. 106.

Fremdwort, Das, im Deutschen von Dr. Rudolf Kleinpaul in Leipzig. Nr. 55.

Fremdwörterbuch, Deutsches, von Dr. Rudolf Kleinpaul in Leipzig. Nr. 273.

Gardinenfabrikation. Textil-Industrie II: Weberei, Wirkerei, Posamentiererei, Spitzen- und Gardinenfabrikation und Filzfabrikation von Prof. Max Gürtler, Direktor der Königl. Technischen Zentralstelle für Textil-Industrie zu Berlin. Mit 27 Figuren. Nr. 185.

Geodäsie von Dr. C. Reinhertz, Professor an der Technischen Hochschule Hannover. Mit 66 Abbild. Nr. 102.

Geographie, Astronomische, von Dr. Siegm. Günther, Professor a. d. Technischen Hochschule in München. Mit 52 Abbildungen. Nr. 92.

— **Physische,** von Dr. Siegm. Günther, Professor an der Königl. Technischen Hochschule in München. Mit 32 Abbildungen. Nr. 26.

— s. auch: Landeskunde. — Länderkunde.

Geologie v. Professor Dr. Eberh. Fraas in Stuttgart. Mit 16 Abbild. und 4 Tafeln mit über 50 Figuren. Nr. 13.

Geometrie, Analytische, der Ebene v. Professor Dr. M. Simon in Straßburg. Mit 57 Figuren. Nr. 65.

— — **Aufgabensammlung zur Analytischen Geometrie der Ebene** von O. Th. Bürklen, Professor am Kgl. Realgymnasium in Schwäb.-Gmünd. Mit 32 Figuren. Nr. 256.

— **Analytische, des Raumes** von Prof. Dr. M. Simon in Straßburg. Mit 28 Abbildungen. Nr. 89.

— — **Aufgabensammlung z. Analyt. Geometrie d. Raumes** von O. Th. Bürklen, Prof. a. Realgymn. i. Schwäb.-Gmünd. M. 8 Fig. Nr. 309.

Geometrie, Darstellende, v. Dr. Rob. Haußner, Prof. an der Universität Jena. I. Mit 110 Figuren. Nr. 142.

— **Ebene,** von G. Mahler, Professor am Gymnasium in Ulm. Mit 111 zweifarb. Fig. Nr. 41.

— **Projektive,** in synthet. Behandlung von Dr. Karl Doehlemann, Prof. an der Universität München. Mit 91 Figuren. Nr. 72.

Sammlung Göschen Je in elegantem Leinwandband 80 Pf.

G. J. Göschen'sche Verlagshandlung, Leipzig.

Geschichte, Badische, von Dr. Karl Brunner, Prof. am Gymnasium in Pforzheim und Privatdozent der Geschichte an der Techn. Hochschule in Karlsruhe. Nr. 230.

— **Bayerische**, von Dr. Hans Ockel in Augsburg. Nr. 160.

— **des Byzantinischen Reiches** von Dr. K. Roth in Kempten. Nr. 190.

— **Deutsche, I: Mittelalter** (bis 1500) von Dr. F. Kurze, Oberl. am Kgl. Luisengymn. in Berlin. Nr. 33.

— — **II: Zeitalter der Reformation u. der Religionskriege** von Dr. F. Kurze, Oberlehrer am Kgl. Luisengymnasium in Berlin. Nr. 34.

— — **III: Vom Westfälischen Frieden bis zur Auflösung des alten Reichs** (1648—1806) von Dr. F. Kurze, Oberl. am Kgl. Luisengymnasium in Berlin. Nr. 35.

— — siehe auch: Quellenkunde.

— **Französische**, von Dr. R. Sternfeld, Prof. a. d. Univers. Berlin. Nr. 85.

— **Griechische**, von Dr. Heinrich Swoboda, Professor an der deutschen Universität Prag. Nr. 49.

— **des 19. Jahrhunderts** v. Oskar Jäger, o. Honorarprofessor an der Univers. Bonn. 1. Bdchn.: 1800—1852. Nr. 216.

— — 2. Bdchn.: 1853 bis Ende d. Jahrh. Nr. 217.

— **Israels** bis auf die griech. Zeit von Lic. Dr. J. Benzinger. Nr. 231.

— **Lothringens**, von Dr. Herm. Derichsweiler, Geh. Regierungsrat in Straßburg. Nr. 6.

— **des alten Morgenlandes** von Dr. Fr. Hommel, Prof. a. d. Univers. München. M. 6 Bild. u. 1 Kart. Nr. 43.

— **Österreichische, I**: Von der Urzeit bis 1439 von Prof. Dr. Franz von Krones, neubearbeitet von Dr. Karl Uhlirz, Prof. an der Univ. Graz. Nr. 104.

Geschichte, Österreichische II: Von 1526 bis zur Gegenwart von Hofrat Dr. Franz von Krones, Prof. an der Univ. Graz. Nr. 105.

— **Römische**, von Realgymnasial-Dir. Dr. Jul. Koch in Grunewald. Nr. 19.

— **Russische**, v. Dr. Wilh. Reeb, Oberl. am Ostergymnasium in Mainz. Nr. 4.

— **Sächsische**, von Professor Otto Kaemmel, Rektor des Nikolaigymnasiums zu Leipzig. Nr. 100.

— **Schweizerische**, von Dr. K. Dändliker, Prof. a. d. Univ. Zürich. Nr. 188.

— **Spanische**, von Dr. Gustav Diercks. Nr. 266.

— **der Chemie** siehe: Chemie.

— **der Malerei** siehe: Malerei.

— **der Mathematik** s.: Mathematik.

— **der Musik** siehe: Musik.

— **der Pädagogik** siehe: Pädagogik.

— **der Physik** siehe: Physik.

— **des deutschen Romans** s.: Roman.

— **der deutschen Sprache** siehe: Grammatik, Deutsche.

— **des deutschen Unterrichtswesens** siehe: Unterrichtswesen.

Geschichtswissenschaft, Einleitung in die, von Dr. Ernst Bernheim, Professor an der Universität Greifswald. Nr. 270.

Gesundheitslehre. Der menschliche Körper, sein Bau und seine Tätigkeiten, von E. Rebmann, Oberschulrat in Karlsruhe. Mit Gesundheitslehre von Dr. med. H. Seiler. Mit 47 Abb. u. 1 Taf. Nr. 18.

Gewerbewesen von Werner Sombart, Professor an d. Universität Breslau. I. II. Nr. 203. 204.

Gewichtswesen. Maß-, Münz- und Gewichtswesen von Dr. Aug. Blind, Prof. an der Handelsschule in Köln. Nr. 283.

Gleichstrommaschine, Die, von C. Kinzbrunner, Ingenieur und Dozent für Elektrotechnik an der Municipal School of Technology in Manchester. Mit 78 Figuren. Nr. 257.

Sammlung Göschen

Je in elegantem Leinwandband **80 Pf.**

G. J. Göschen'sche Verlagshandlung, Leipzig.

Gletscherkunde von Dr. Fritz Machacek in Wien. Mit 5 Abbild. im Text und 11 Tafeln. Nr. 154.

Gottfried von Straßburg. Hartmann von Aue, Wolfram von Eschenbach u. Gottfried von Straßburg. Auswahl aus dem höf. Epos mit Anmerkungen und Wörterbuch von Dr. K. Marold, Prof. am Kgl. Friedrichskollegium zu Königsberg i. Pr. Nr. 22.

Grammatik, Deutsche, und kurze Geschichte der deutschen Sprache von Schulrat Professor Dr. O. Lyon in Dresden. Nr. 20.

— **Griechische,** I: Formenlehre von Dr. Hans Meltzer, Professor an der Klosterschule zu Maulbronn. Nr. 117.

— — II: Bedeutungslehre und Syntax von Dr. Hans Meltzer, Professor an der Klosterschule zu Maulbronn. Nr. 118.

— **Lateinische.** Grundriß der lateinischen Sprachlehre von Professor Dr. W. Votsch in Magdeburg. Nr. 82.

— **Mittelhochdeutsche.** Der Nibelunge Nôt in Auswahl und mittelhochdeutsche Grammatik mit kurzem Wörterbuch von Dr. W. Golther, Prof. a. d. Universität Rostock. Nr. 1.

— **Russische,** von Dr. Erich Berneker, Professor an der Universität Prag. Nr. 66.

— — siehe auch: Russisches Gesprächsbuch. — Lesebuch.

Handelskorrespondenz, Deutsche, von Prof. Th. de Beaux, Officier de l'Instruction Publique. Nr. 182.

— **Englische,** von E. E. Whitfield, M. A., Oberlehrer an King Edward VII Grammar School in King's Lynn. Nr. 237.

— **Französische,** v. Professor Th. de Beaux, Officier de l'Instruction Publique. Nr. 183.

— **Italienische,** von Professor Alberto de Beaux, Oberlehrer am Kgl. Institut S. S. Annunziata in Florenz. Nr. 219.

— **Spanische,** von Dr. Alfredo Nadal de Mariezcurrena. Nr. 295.

Handelspolitik, Auswärtige, von Dr. Heinr. Sieveking, Prof. an der Universität Marburg. Nr. 245.

Handelswesen, Das, von Dr. Wilh. Lexis, Professor an der Universität Göttingen. I: Das Handelspersonal und der Warenhandel. Nr. 296.

— — II: Die Effektenbörse und die innere Handelspolitik. Nr. 297.

Harmonielehre von A. Halm. Mit vielen Notenbeilagen. Nr. 120.

Hartmann von Aue, Wolfram von Eschenbach und Gottfried von Straßburg. Auswahl aus dem höfischen Epos mit Anmerkungen und Wörterbuch von Dr. K. Marold, Professor am Königlichen Friedrichskollegium zu Königsberg i. Pr. Nr. 22.

Hauptliteraturen, Die, d. Orients v. Dr. M. Haberlandt, Privatdoz. a. d. Universität Wien. I. II. Nr. 162. 163.

Heldensage, Die deutsche, von Dr. Otto Luitpold Jiriczek, Prof. an der Universität Münster. Nr. 32.

— siehe auch: Mythologie.

Industrie, Anorganische Chemische, v. Dr. Gust. Rauter in Charlottenburg. I: Die Leblancsodaindustrie und ihre Nebenzweige. Mit 12 Tafeln. Nr. 205.

— — II: Salinenwesen, Kalisalze, Düngerindustrie und Verwandtes. Mit 6 Tafeln. Nr. 206.

— — III: Anorganische Chemische Präparate. Mit 6 Tafeln. Nr. 207.

— **der Silikate, der künstl. Bausteine und des Mörtels.** I: Glas- und keramische Industrie von Dr. Gustav Rauter in Charlottenburg. Mit 12 Tafeln. Nr. 233.

— — II: Die Industrie der künstlichen Bausteine und des Mörtels. Mit 12 Tafeln. Nr. 234.

Integralrechnung von Dr. Friedr. Junker, Professor am Karlsgymn. in Stuttgart. Mit 89 Fig. Nr. 88.

Integralrechnung. Repetitorium und Aufgabensammlung zur Integralrechnung von Dr. Friedrich Junker, Professor am Karlsgymnasium in Stuttgart. Mit 50 Figuren. Nr. 147.

Sammlung Göschen

Je in elegantem Leinwandband **80 Pf.**

G. J. Göschen'sche Verlagshandlung, Leipzig.

Logarithmen. Vierstellige Tafeln und Gegentafeln für logarithmisches und trigonometrisches Rechnen in zwei Farben zusammengestellt von Dr. Hermann Schubert, Professor an der Gelehrtenschule d. Johanneums in Hamburg. Nr. 81.

Logik. Psychologie und Logik zur Einführung in die Philosophie von Dr. Th. Elsenhans. Mit 13 Figuren. Nr. 14.

Luther, Martin, Thom. Murner und das Kirchenlied des 16. Jahrhunderts. Ausgewählt und mit Einleitungen und Anmerkungen versehen von Prof. G. Berlit, Oberlehrer am Nikolaigymnasium zu Leipzig. Nr. 7.

Magnetismus. Theoretische Physik III. Teil: Elektrizität und Magnetismus. Von Dr. Gustav Jäger, Professor an der Universität Wien. Mit 33 Abbild. Nr. 78.

Malerei, Geschichte der, I. II. III. IV. V. von Dr. Rich. Muther, Professor an der Universität Breslau. Nr. 107—111.

Mälzerei. Brauereiwesen I: Mälzerei von Dr. Paul Dreverhoff, Direktor d. Öffentl. u. I. Sächs. Versuchsstation für Brauerei u. Mälzerei, sowie der Brauer- u. Mälzerschule zu Grimma. Nr. 303.

Maschinenelemente, Die. Kurzgefaßtes Lehrbuch mit Beispielen für das Selbststudium und den prakt. Gebrauch von Fr. Barth, Oberingenieur in Nürnberg. Mit 86 Fig. Nr. 3.

Maß-, Münz- und Gewichtswesen von Dr. August Blind, Prof. an der Handelsschule in Köln. Nr. 283.

Maßanalyse von Dr. Otto Röhm in Stuttgart. Nr. 221.

Materialprüfungswesen. Einführ. i. d. mod. Technik d. Materialprüfung von K. Memmler, Diplomingenieur. Ständ. Mitarbeiter a. Kgl. Material-Prüfungsamte zu Groß-Lichterfelde. I: Materialeigenschaften. — Festigkeitsversuche. — Hilfsmittel f. Festigkeitsversuche. Mit 55 Fig. Nr. 311.

Materialprüfungswesen. Einführ. i. d. mod. Technik d. Materialprüfung von K. Memmler, Diplomingenieur. Ständ. Mitarbeiter a. Kgl. Material-Prüfungsamte zu Groß-Lichterfelde. II: Metallprüfung u. Prüfung von Hilfsmaterialien d. Maschinenbaues. — Baumaterialprüfung. — Papierprüfung. — Schmiermittelprüfung. — Einiges über Metallographie. Mit 31 Figuren. Nr. 312

Mathematik, Geschichte der, von Dr. A. Sturm, Professor am Obergymnasium in Seitenstetten. Nr. 226.

Mechanik. Theoret. Physik I. Teil: Mechanik und Akustik. Von Dr. Gustav Jäger, Prof. an der Univ. Wien. Mit 19 Abbild. Nr. 76.

Meereskunde, Physische, von Dr. Gerhard Schott, Abteilungsvorsteher an der Deutschen Seewarte in Hamburg. Mit 28 Abbild. im Text und 8 Tafeln. Nr. 112.

Messungsmethoden, Physikalische v. Dr. Wilhelm Bahrdt, Oberlehrer an der Oberrealschule in Groß-Lichterfelde. Mit 49 Fig. Nr. 301.

Metalle (Anorganische Chemie 2. Teil) v. Dr. Oskar Schmidt, dipl. Ingenieur, Assistent an der Königl. Baugewerkschule in Stuttgart. Nr. 212.

Metalloide (Anorganische Chemie 1. Teil) von Dr. Oskar Schmidt, dipl. Ingenieur, Assistent an der Kgl. Baugewerkschule in Stuttgart. Nr. 211.

Meteorologie von Dr. W. Trabert, Professor an der Universität Innsbruck. Mit 49 Abbildungen und 7 Tafeln. Nr. 54.

Mineralogie von Dr. R. Brauns, Professor an der Universität Kiel. Mit 130 Abbildungen. Nr. 29.

Minnesang und Spruchdichtung. Walther v. d. Vogelweide mit Auswahl aus Minnesang und Spruchdichtung. Mit Anmerkungen und einem Wörterbuch von Otto Güntter, Professor an der Oberrealschule und an der Techn. Hochschule in Stuttgart. Nr. 23.

Sammlung Göschen — Je in elegantem Leinwandband 80 Pf.

G. J. Göschen'sche Verlagshandlung, Leipzig.

Religionswissenschaft, Abriß der vergleichenden, von Prof. Dr. Th. Achelis in Bremen. Nr. 208.

Roman. Geschichte d. deutschen Romans von Dr. Hellmuth Mielke. Nr. 229.

Russisch-Deutsches Gesprächsbuch von Dr. Erich Berneker, Professor an der Universität Prag. Nr. 68.

Russisches Lesebuch mit Glossar von Dr. Erich Berneker, Professor an der Universität Prag. Nr. 67.

— — siehe auch: Grammatik.

Sachs, Hans. Ausgewählt und erläutert von Prof. Dr. Julius Sahr. Nr. 24.

Säugetiere. Das Tierreich I: Säugetiere von Oberstudienrat Prof. Dr. Kurt Lampert, Vorsteher des Kgl. Naturalienkabinetts in Stuttgart. Mit 15 Abbildungen. Nr. 282.

Schattenkonstruktionen v. Prof. J. Vonderlinn in Breslau. Mit 114 Fig. Nr. 236.

Schmarotzer u. Schmarotzertum in der Tierwelt. Erste Einführung in die tierische Schmarotzerkunde v. Dr. Franz v. Wagner, a. o. Prof. a. d. Univers. Gießen. Mit 67 Abbildungen. Nr. 151.

Schule, Die deutsche, im Auslande, von Hans Amrhein in Halle a. S. Nr. 259.

Schulpraxis. Methodik der Volksschule von Dr. R. Seyfert, Seminaroberlehrer in Annaberg. Nr. 50.

Simplicius Simplicissimus von Hans Jakob Christoffel v. Grimmelshausen. In Auswahl herausgegeb. von Prof. Dr. F. Bobertag, Dozent an der Universität Breslau. Nr. 138.

Soziologie von Prof. Dr. Thomas Achelis in Bremen. Nr. 101.

Spitzenfabrikation. Textil-Industrie II: Weberei, Wirkerei, Posamentiererei, Spitzen- und Gardinenfabrikation und Filzfabrikation von Professor Max Gürtler, Direktor der Königl. Technischen Zentralstelle für Textil-Industrie zu Berlin. Mit 27 Figuren. Nr. 185.

Sprachdenkmäler, Gotische, mit Grammatik, Übersetzung und Erläuterungen v. Dr. Herm. Jantzen, Direktor der Königin Luise-Schule in Königsberg i. Pr. Nr. 79.

Sprachwissenschaft, Germanische, v. Dr. Rich. Loewe in Berlin. Nr. 238.

— **Indogermanische,** v. Dr. R. Meringer, Prof. a. d. Univ. Graz. Mit einer Tafel. Nr. 59.

Sprachwissenschaft, Romanische, von Dr. Adolf Zauner, Privatdozent an der Universität Wien. I: Lautlehre u. Wortlehre I. Nr. 128.

— — II: Wortlehre II u. Syntax. Nr. 250.

— **Semitische,** von Dr. C. Brockelmann, Professor an der Universität Königsberg. Nr. 291.

Staatsrecht, Preußisches, von Dr. Fritz Stier-Somlo, Professor an der Universität Bonn. 2 Teile. Nr. 298 u. 299.

Stammeskunde, Deutsche, von Dr. Rudolf Much, a. o. Professor an d. Universität Wien. Mit 2 Karten und 2 Tafeln. Nr. 126.

Statik, I. Teil: Die Grundlehren der Statik starrer Körper v. W. Hauber, diplom. Ing. Mit 82 Fig. Nr. 178.

— II. Teil: Angewandte Statik. Mit 61 Figuren. Nr. 179.

Stenographie nach dem System von F. X. Gabelsberger von Dr. Albert Schramm, Mitglied des Kgl. Stenogr. Instituts Dresden. Nr. 246.

— Lehrbuch der Vereinfachten Deutschen Stenographie (Einig.-System Stolze-Schrey) nebst Schlüssel, Lesestücken u. einem Anhang v. Dr. Amsel, Oberlehrer des Kadettenhauses Oranienstein. Nr. 86.

Stereochemie von Dr. E. Wedekind, Professor a. d. Universität Tübingen. Mit 34 Abbild. Nr. 201.

Stereometrie von Dr. R. Glaser in Stuttgart. Mit 44 Figuren. Nr. 97.

Stilkunde von Karl Otto Hartmann, Gewerbeschulvorstand in Lahr. Mit 7 Vollbildern und 195 Text-Illustrationen. Nr. 80.

